

UNIVERSITÀ DI PISA
SCUOLA DI DOTTORATO "LEONARDO DA VINCI"
SCIENZE E TECNICHE DELL'INGEGNERIA CIVILE

LINEE GUIDA PER IL PROGETTO, CONTROLLO E MONITORAGGIO DEGLI ARGINI FLUVIALI

Ing. Barbara Cosanti

21 Febbraio 2011

barbara.cosanti@for.unipi.it

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Il termine **ARGINE** è usato per definire un terrapieno la cui funzione è quella di fornire protezione dalle piene.



Essi si trovano a contatto con l'acqua solo per alcuni giorni o settimane durante l'anno.

I terrapieni che sono soggetti all'azione dell'acqua per periodi di tempo prolungati, o permanentemente, devono essere progettati secondo i criteri utilizzati per le dighe in terra.

Anche se gli argini sono simili a piccole dighe in terra, essi differiscono da queste ultime per alcuni aspetti fondamentali:

- un argine può essere saturo solo per un limitato periodo di tempo;
- l'allineamento degli argini è dettato dalla loro funzione di protezione dalle piene che spesso comporta la costruzione su terreni di fondazione poveri;
- il materiale di recupero utilizzato per la costruzione è generalmente ottenuto da fossi superficiali o canali scavati nelle adiacenze dell'argine, caratterizzato da una elevata eterogeneità e dall'essere lontano dal materiale ideale. La scelta della sezione arginale è spesso basata sulle proprietà del materiale povero che deve essere utilizzato.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

ARGINI IN TERRA =

Rilevati di altezza generalmente inferiore ai 10 ÷ 15 m con compiti di tenuta d'acqua.

**PROBLEMI PROGETTUALI
PER LA REALIZZAZIONE DI
NUOVE ARGINATURE:**

Altezza dell'argine;

Tipi di terra disponibili per la costruzione;

Vincoli di tipo geometrico e idraulico

**PROGETTAZIONE DI
RAFFORZAMENTI DI
ARGINATURE ESISTENTI:**

Richiede di conoscere la situazione geotecnica ed idraulica dell'argine esistente oltre che del terreno di fondazione.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Major and Minimum Requirements

Step	Procedure
1	Conduct geological study based on a thorough review of available data including analysis of aerial photographs. Initiate preliminary subsurface explorations.
2	Analyze preliminary exploration data and from this analysis establish preliminary soil profiles, borrow locations, and embankment sections.
3	Initiate final exploration to provide: <ol style="list-style-type: none">Additional information on soil profiles.Undisturbed strengths of foundation materials.More detailed information on borrow areas and other required excavations.
4	Using the information obtained in Step 3: <ol style="list-style-type: none">Determine both embankment and foundation soil parameters and refine preliminary sections where needed, noting all possible problem areas.Compute rough quantities of suitable material and refine borrow area locations.
5	Divide the entire levee into reaches of similar foundation conditions, embankment height, and fill material and assign a typical trial section to each reach.
6	Analyze each trial section as needed for: <ol style="list-style-type: none">Underseepage and through seepage.Slope stability.Settlement.Trafficability of the levee surface.
7	Design special treatment to preclude any problems as determined from Step 6. Determine surfacing requirements for the levee based on its expected future use.
8	Based on the results of Step 7, establish final sections for each reach.
9	Compute final quantities needed; determine final borrow area locations.
10	Design embankment slope protection.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

CARATTERISTICHE DELLA SEZIONE:

Scarpate con pendenze variabili da 1:2 a 1:5 verso fiume e 1:2 verso campagna interrotte da banche di larghezza variabile da pochi metri sino a 20 m.

La pendenza molto più dolce verso campagna è dettata non solo dall'esigenza di **CONTENERE LA LINEA DI INFILTRAZIONE**, ma anche dalla necessità di **CONTRASTARE IL PERICOLO DI SIFONAMENTO** attraverso il terreno di fondazione e di franamento dell'argine verso campagna.

Le esigenze progettuali, legate a problemi idraulici e strutturali del corpo arginale e del terreno di fondazione, hanno portato spesso alla realizzazione di rilevati in terra di grandi dimensioni con impronte alla base che raggiungono e superano i 50 m.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

1

Circolare del 12 Febbraio 1873 n°3651/2200 emanata dal ministero LL.PP.

(A seguito degli eventi alluvionali dell'ottobre 1872).

1. ALTEZZA. L'altezza di progetto delle arginature era quella raggiunta dalla massima piena conosciuta, aumentata del franco (60÷100 cm).

2. LARGHEZZA DEL CORONAMENTO. Pari ad almeno 10 m di fronte ai centri abitati e in particolare alle città.

3. PENDENZA DELLA SCARPATA. Paramento a fiume: 3:2 fuori acqua e 2:1 in acqua; paramento a campagna: 2:1.

4. BANCHE. Poste a 3 m dal coronamento o l'una dall'altra, dello sviluppo da 6 a 10 m e della pendenza del 5%, in particolare di fronte ai froldi.

5. PISTE DI SERVIZIO. Poste a 3 m dal coronamento dell'arginatura, con base in sabbia e ghiaia e freccia 1/20.

6. FROLDI. Difesi con fascioni e buzzoni al piede con sovrastante berma in burghe e successivo rivestimento in pietrame dello spessore medio di 1 m. Il peso medio dei massi doveva essere di 20 kg circa con un 25% di pietrame di pezzatura inferiore ma ≥ 8 kg per l'intaso dei vuoti.

7. MATERIALE DA COSTRUZIONE. La direttiva non dava indirizzi \Rightarrow le disposizioni in materia sono ancora più lontane nel tempo.

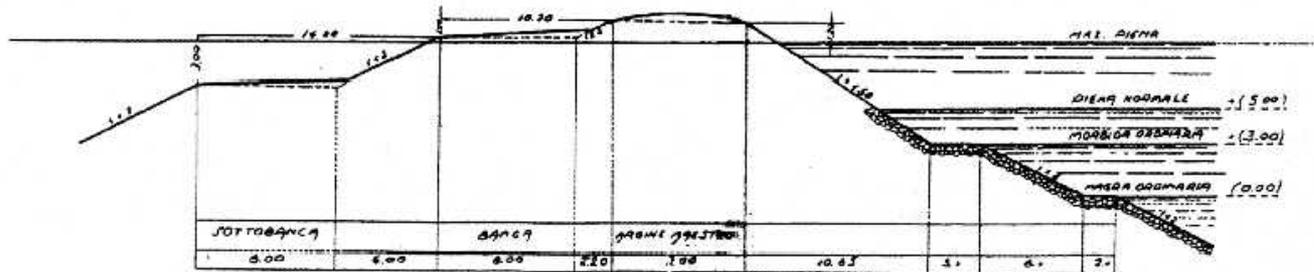
I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

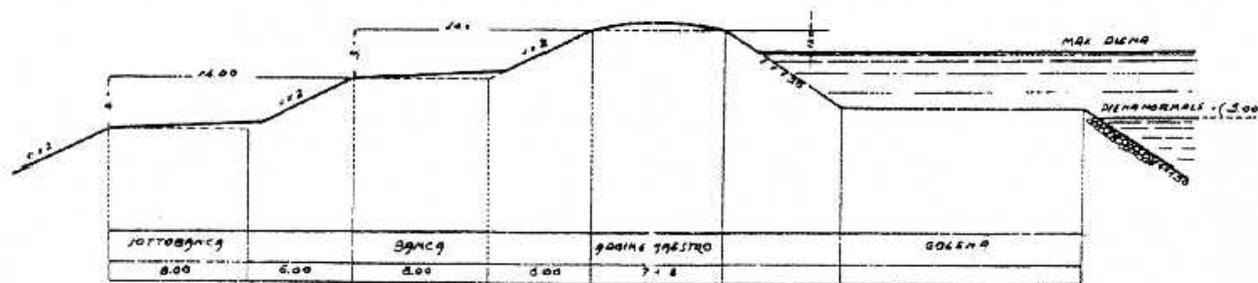
1

Circolare del 12 Febbraio 1873 n°3651/2200 emanata dal ministero LL.PP.
(A seguito degli eventi alluvionali dell'ottobre 1872).

ARGINE IN FROLDO



ARGINE IN GOLENA



Sezioni arginatura maestra.

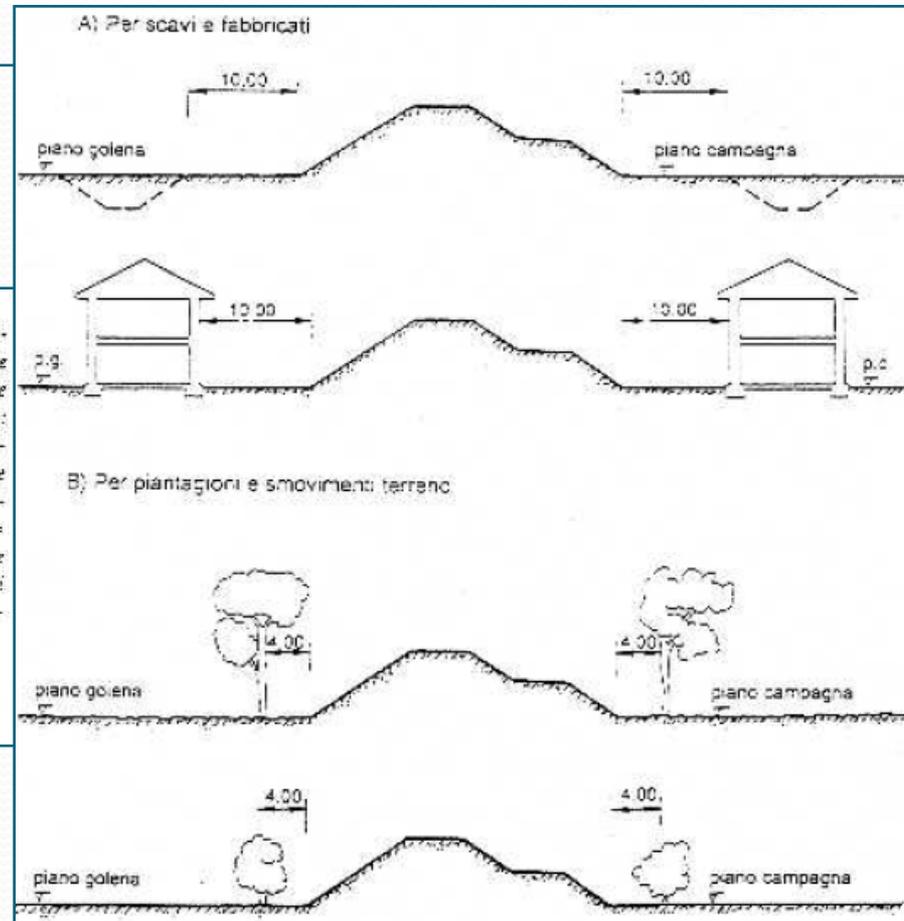
I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

2

T.U. sulle opere idrauliche (RD 25/7/1904 n.593, Art. 96, lettera f).

Recepisce le istanze relative l'integrità e la sicurezza delle arginature nei confronti di interventi o insediamenti antropici.



Di-
stanze minime
in m dal piede
di un argine:
norme del Ma-
gistrato alle
acque di Vene-
zia (TN-VR =
confine fra le
province di
Trento e Vero-
na)

Fiume	opera	a fiume	a campagna
Adige	Scavi:		
	- a monte TN-VR	10	10
Tutti	- a monte TN-VR	10	20
		10	10
Adige	Fabbriche:		
	- a monte TN-VR	10	10
Tutti	- a monte TN-VR	10	20
		10	10
Tutti	Alberi e siepi	4	4
Tutti	Depositi:		
	- in alveo	Proibiti	
	- fuori alveo	20	20

Regolamento ANSALDI (1819)

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

3

Istruzioni Generali del Circolo Superiore di Ispezione per il Po dell'aprile 1929.
(A seguito degli eventi alluvionali del maggio – giugno 1926).

Indicano alcune tipologie di sezioni e dispongono il profilo a campagna in modo da coprire una ipotetica linea di infiltrazione disposta con pendenze variabili da 1:4 a 1:6, passando dal tratto a monte a quello a valle del fiume.

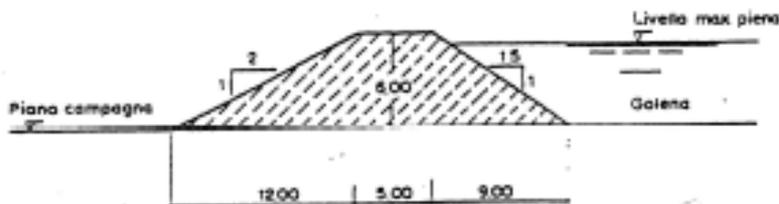
I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

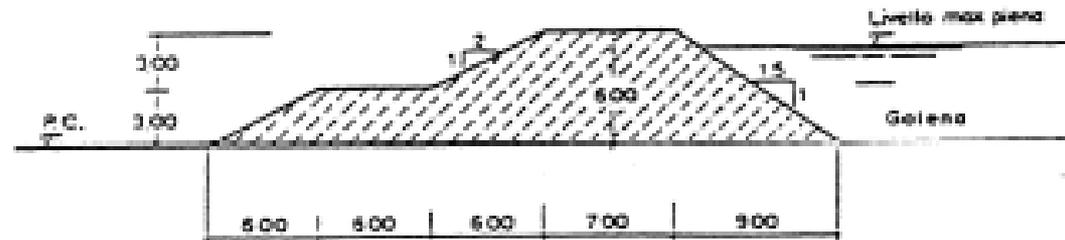
3

Istruzioni Generali del Circolo Superiore di Ispezione per il Po dell'aprile 1929.
(A seguito degli eventi alluvionali del maggio – giugno 1926).

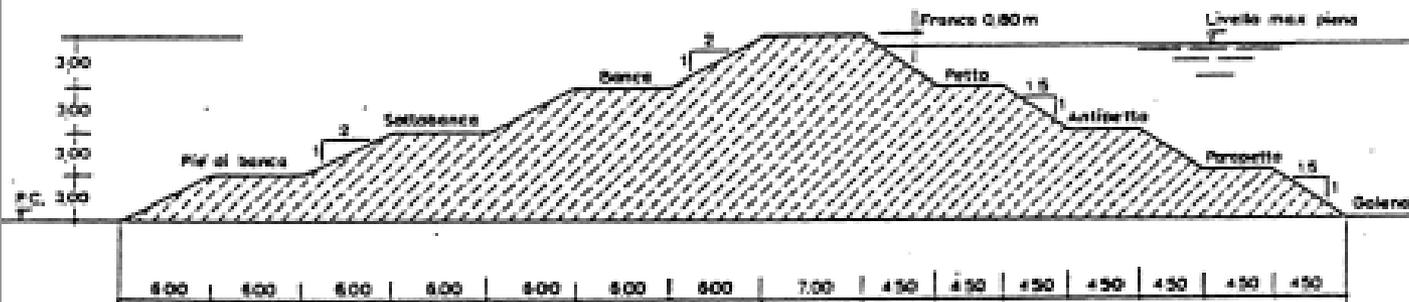
a) Argine semplice



b) Argine con semplice banca



c) Argine con banca, sottobanca, pie di banca e petta, antipetto e parapetto



I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

4

Circolare del 25 Luglio 1952 emanata dal Circolo Superiore di Ispezione per il Po.
(A seguito degli eventi alluvionali dell'ottobre 1951).

Ha portato a definire la sezione attuale dell'arginatura maestra del medio e basso Po.

1. La sagoma definitiva degli argini dovrà risultare in modo da inviluppare la linea di imbibizione con pendenza 1:6, la massima piena e il piano campagna, con scarpate con pendenza 1:1.5 verso fiume e 1:2 verso campagna e banche di larghezze variabili da 6 a 10 m.
2. In corrispondenza dei centri abitati il franco deve essere di almeno 20 cm superiore a quello ordinario.
3. I ringrossi arginali dovevano eseguirsi, di regola, a campagna.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

4

Circolare del 25 Luglio 1952 emanata dal Circolo Superiore di Ispezione per il Po.
(A seguito degli eventi alluvionali dell'ottobre 1951).

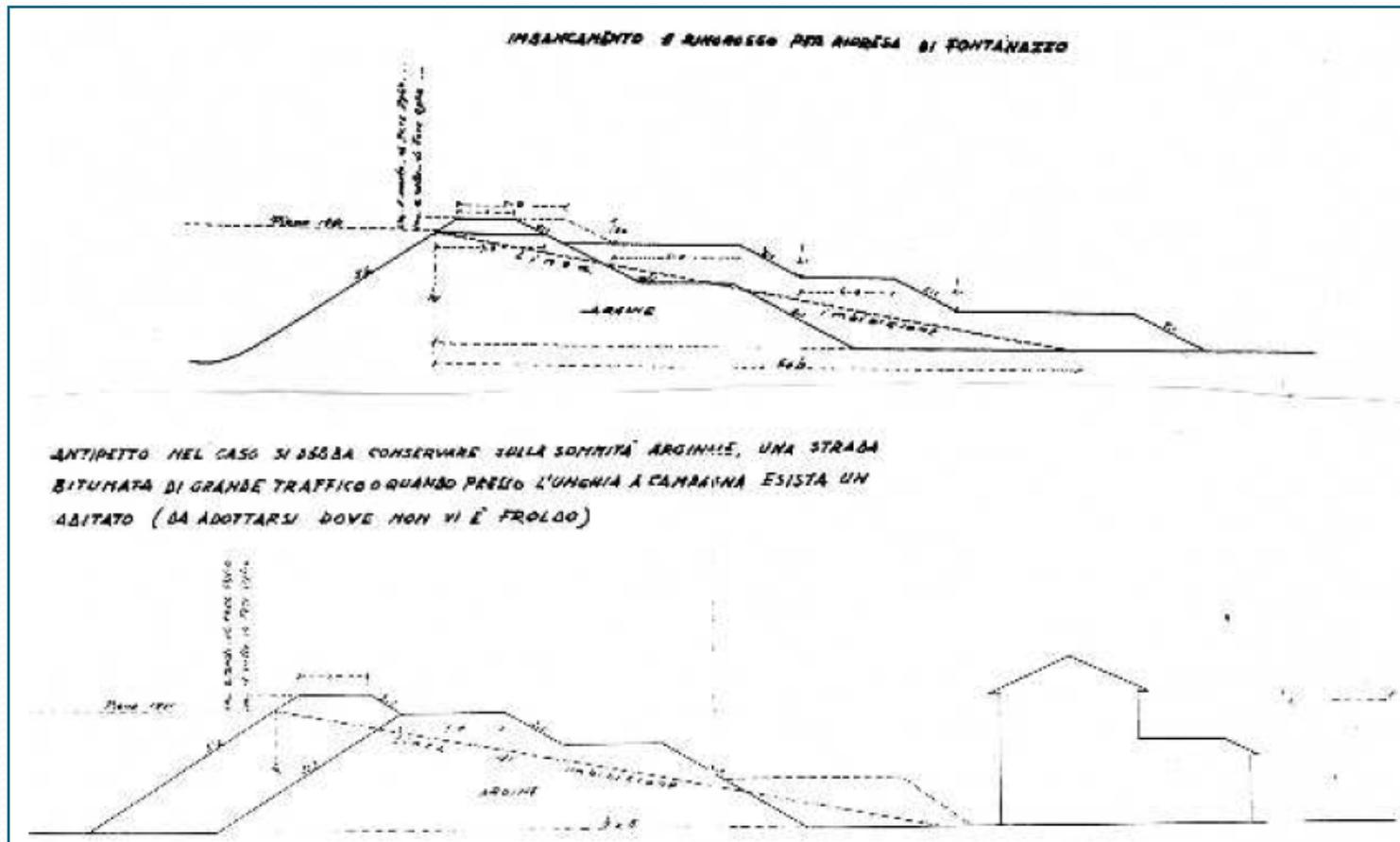
4. Le ristrutturazioni delle arginature devono avvenire conservando i fabbricati esistenti a distanza \geq **di 30 m** dal piede dell'argine, quelli a distanza inferiore dovevano essere demoliti mentre la costruzione di nuovi fabbricati avrebbe dovuto avvenire a distanza \geq **50 m** (regola che non è stato possibile far rispettare).
5. I pozzi aperti o fresati devono trovarsi ad una distanza \geq 70 m, eccezionalmente solo per quelli ad uso potabile, in presenza di centri abitati, 50 m.
6. Nessuna indicazione circa le caratteristiche del materiale da costruzione.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

4

Circolare del 25 Luglio 1952 emanata dal Circolo Superiore di Ispezione per il Po.
(A seguito degli eventi alluvionali dell'ottobre 1951).



I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

5

D.M. 24/03/1982, Punto H: “Dighe in materiali sciolti”;

D.M. 11/03/1988, Punto E: “Manufatti di materiali sciolti”.

Indicano i coefficienti di sicurezza minimi da adottare nelle verifiche di stabilità globale allo scivolamento:

1.2 a termine costruzione;

1.4 in condizioni di massima piena;

1.2 a seguito di rapido svuotamento ;

1.2 per tutte le opere ubicate in zona sismica.

La normativa geotecnica suggerisce un unico coefficiente pari a 1.3 in assenza di sisma.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

6 Piano S.I.M.P.O. 1982 dell’Autorità di Bacino del Po.
(A seguito dell’ evento del 1951).

La quota della sommità arginale era stabilita dal livello massimo di piena conosciuto aumentato del dovuto franco.

7 PS45 del Comitato Istituzionale dell’Autorità di Bacino del Po, delibera n°9 del 10 maggio 1995.

Assume come piena di progetto, per gli affluenti del Po, quella a tempo di ritorno di 200 anni, e per il Po una combinazione tra l’evento di piena del 1994 e quella del 1951 , **“94 +51”**, che risulta molta prossima a quella conseguente ad un evento a tempo di ritorno di 200 anni.

I livelli così determinati differiscono in modo sostanziale (anche più di 1 m) rispetto a quelli del S.I.M.P.O. 1982 e, dal momento che erano in corso di esecuzione opere di rialzo e ingrosso arginale, il nuovo riferimento approvato ha creato una situazione d’incongruenza.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine



“Linee guida per l’esecuzione degli interventi di adeguamento delle arginature di Po in corso di esecuzione e di progettazione” del Magistrato per il Po del 22 ottobre 1998.

Prescrizioni:

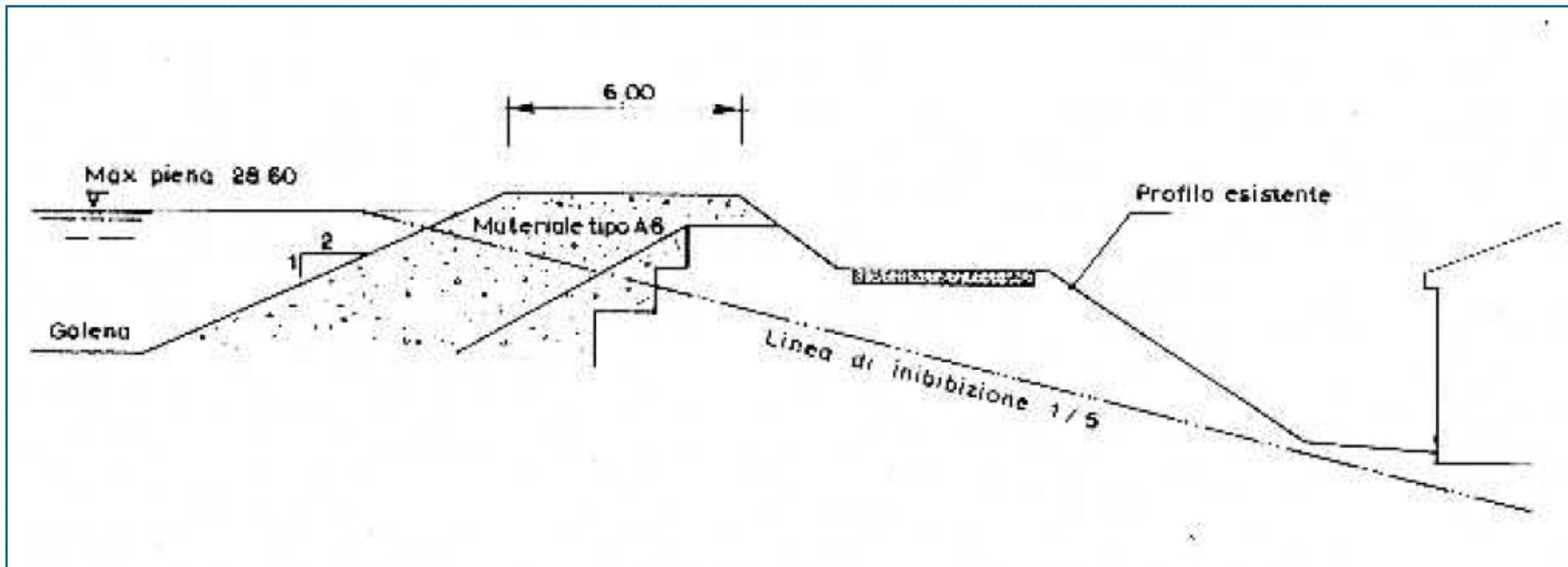
1. Mantenere le quote di coronamento pari a quelle previste nel S.I.M.P.O. 1982;
2. Effettuare, dove possibile, i rialzi e i ringrossi dei coronamenti arginali operando a fiume, con un addolcimento della pendenza sino a 1:2 e la eventuale formazione di una banca di 3.5 m a 2 ÷ 3 m sul piano della golenia;
3. Prevedere una larghezza di coronamento che possa consentire, a studi completati, di conseguire il rialzo definitivo (per l’adeguamento alle quote della piena di riferimento “94 + 51” adottata dall’Autorità di Bacino) mediante semplice incappucciamento.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

8

“Linee guida per l’esecuzione degli interventi di adeguamento delle arginature di Po in corso di esecuzione e di progettazione” del Magistrato per il Po del 22 ottobre 1998.



Rinforzo arginature.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

9

Integrazione delle linee guida in seguito alla Convenzione n°5984 del 5 luglio 1999 del Magistrato del Po in collaborazione con le Università degli Studi di Parma, di Brescia, di Roma “La Sapienza” e di Napoli “Federico II”.

FINALITÀ CONVENZIONE



Mettere a punto una metodologia progettuale degli argini legata ai problemi di stabilità e sicurezza idraulica, che tenesse conto delle *condizioni di carico idraulico variabile* a cui è sottoposto un argine e delle caratteristiche di resistenza dei materiali da costruzione in relazione al loro grado di saturazione.



TRATTO SPERIMENTALE DI ARGINE
loc. S. Martino, Comune di Viadana (MN)

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

9

Integrazione delle linee guida in seguito alla Convenzione n°5984 del 5 luglio 1999 del Magistrato del Po in collaborazione con le Università degli Studi di Parma, di Brescia, di Roma “La Sapienza” e di Napoli “Federico II”.

1. I rinforzi e rialzi a fiume possono essere eseguiti con materiali poco permeabili tipo A-7 ÷ A – 6 (Norme CNR – UNI 10006 – Ed. 2002) con contenuto in sabbia non inferiore al 15%, secondo i criteri indicati dalle linee guida del 1998.

Per evitare fenomeni di instabilità del paramento a fiume dopo le piene e per aumentare la capacità di tenuta e ritardare l'avanzamento all'interno del corpo dell'argine della superficie di saturazione progettare le scarpate a fiume con pendenza 1:2 con banche intermedie per altezze del paramento maggiori di 5 m.

Il nuovo petto deve essere immerso al piede dell'argine con un taglione approfondito di 1÷2 m.

2. I rinforzi a campagna vanno eseguiti con materiali di media permeabilità tipo A – 6 ÷ A – 4 con contenuto in sabbia non maggiore del 50% e comunque più permeabili di quelli costituenti il corpo arginale esistente.

3. I materiali da utilizzare per i ringrossi e rinforzi possono essere messi in opera con riferimento alla densità Proctor Standard.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Normativa di riferimento nella progettazione e/o ristrutturazione di un argine

9

Integrazione delle linee guida in seguito alla Convenzione n°5984 del 5 luglio 1999 del Magistrato del Po in collaborazione con le Università degli Studi di Parma, di Brescia, di Roma “La Sapienza” e di Napoli “Federico II”.

4. Qualora non fosse possibile reperire materiali idonei, l'utilizzo di terreni grossolani e permeabili comporta il progetto di interventi di impermeabilizzazione del corpo arginale.

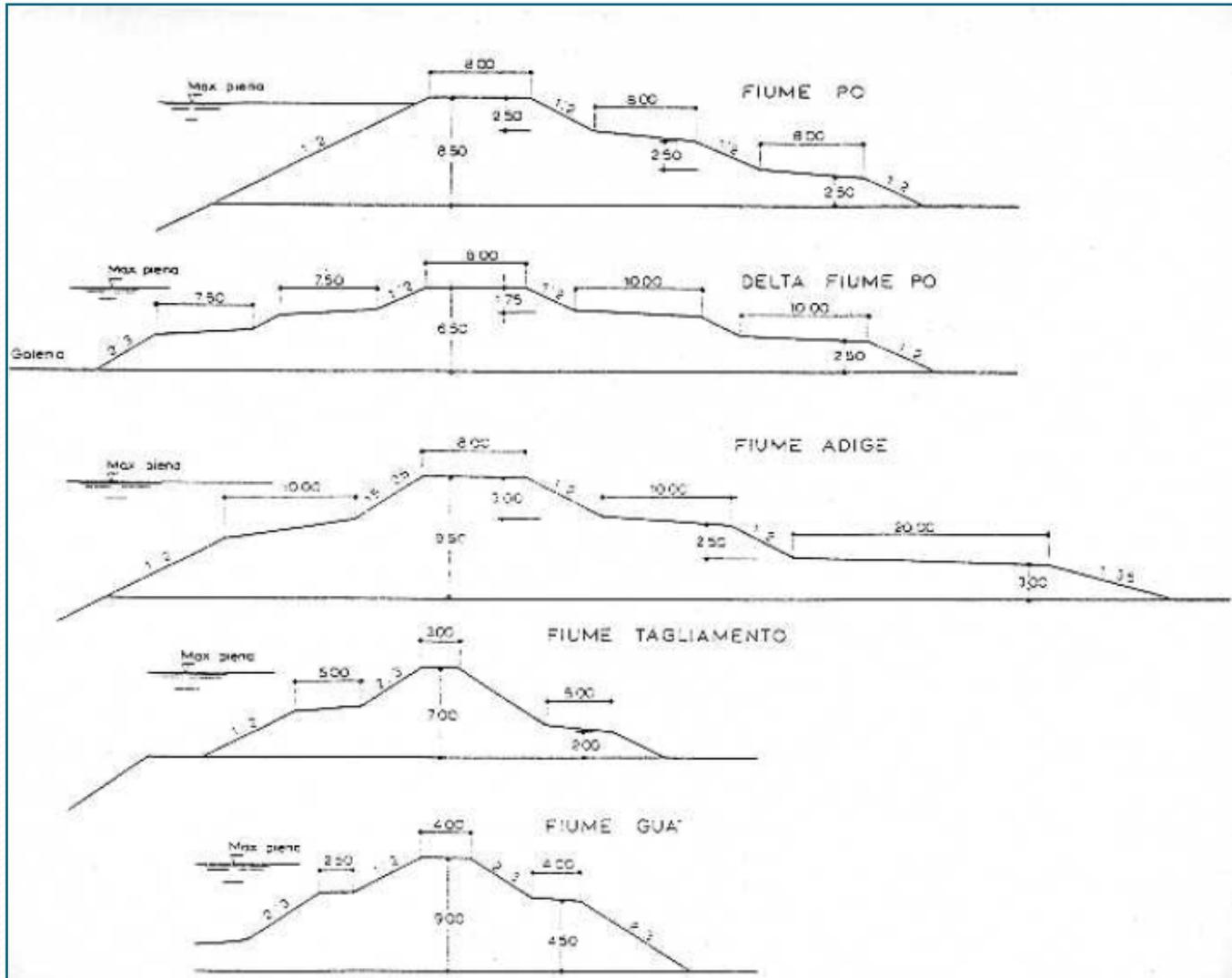
5. Per assicurare l'impermeabilizzazione dei terreni di fondazione, in grado di garantire una effettiva tenuta idraulica contro il pericolo di sifonamento, è necessario costruire diaframmature continue di lunghezza sufficiente ad evitare fenomeni di aggiramento del flusso e tali da intercettare interamente il banco permeabile.

6. È sempre e comunque valido il criterio di progetto di disporre il profilo dell'argine a campagna, tale da ricoprire per almeno 1 m la linea teorica di imbibizione con pendenza di 1:5 e 1:6.

In presenza di arginature realizzate con materiali di caratteristiche note, in condizioni geotecniche ben definite e in assenza di pericolo di sifonamento a campagna, si possono progettare sezioni arginali più ridotte rispettivamente con linee teoriche di imbibizione di 1:4.5 ÷ 1:5.5.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

SEZIONI TIPO DI ARGINATURE FLUVIALI:



I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

Il progetto, la costruzione e l'esercizio delle arginature:

- delle CASSE DI ESPANSIONE



Problemi analoghi ai rilevati arginali di protezione dei fiumi accompagnati da alcune questioni peculiari strettamente legate al fatto che il loro utilizzo è previsto per periodi molto brevi e saltuari in occasione di eventi di piena importanti.

**- di DIFESA E PROTEZIONE
DAL MARE**

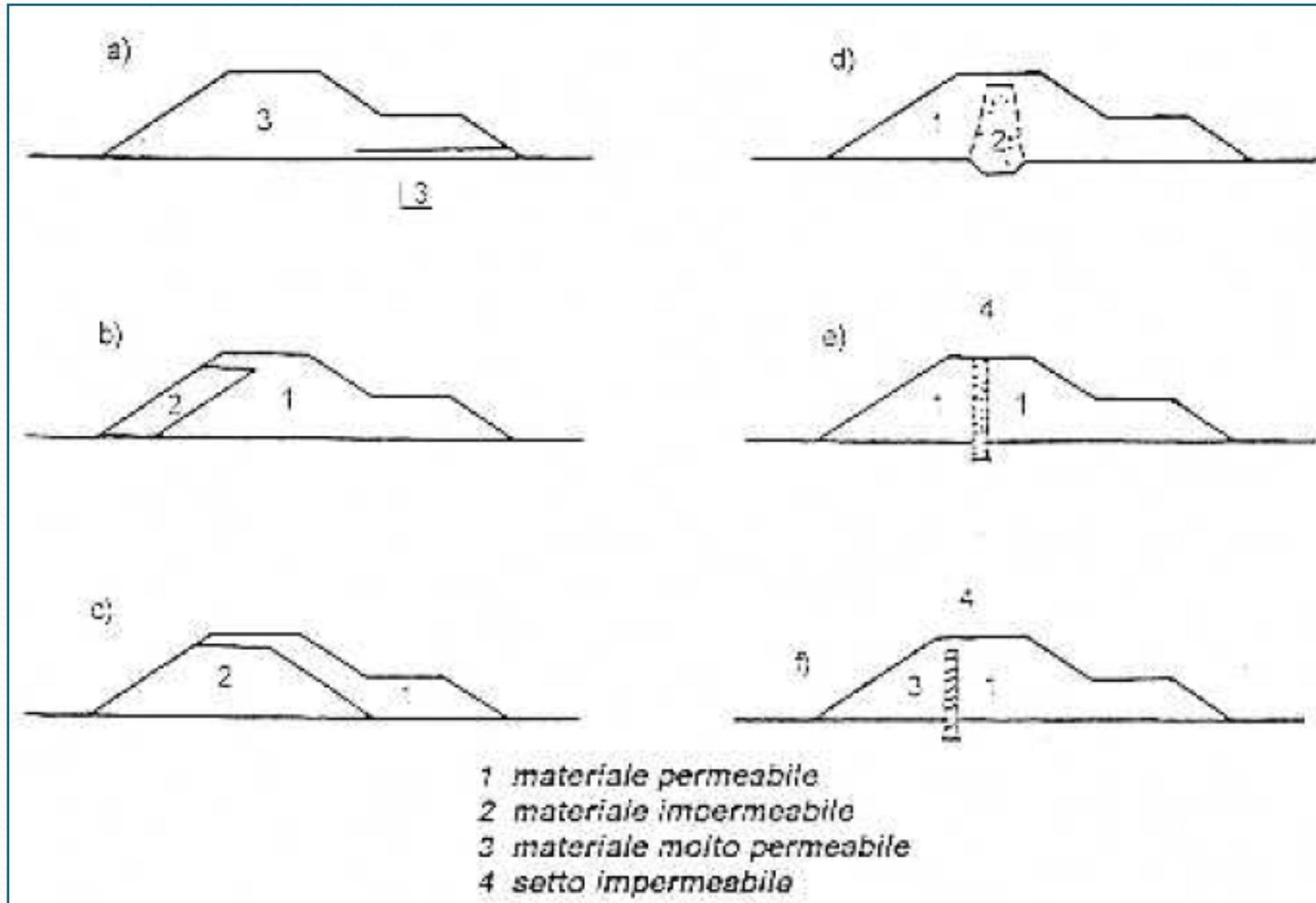


L'aspetto rilevante riguarda il paramento esposto al moto ondoso.

La tipologia delle arginature è legata essenzialmente alla possibilità di reperire e disporre di GRANDI QUANTITÀ DI MATERIALI DA COSTRUZIONE.

Nella maggior parte dei casi non è possibile ricorrere a sezioni arginali formate da materiale omogeneo ed è quindi necessario il ricorso a sezioni con IMPIEGO DI NUCLEI O DIAFRAMMI IMPERMEABILI realizzati con materiali poco permeabili e poco suscettibili a rigonfiamento.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali



Sezioni arginali a zone.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

I MATERIALI DA COSTRUZIONE

I materiali terrosi impiegati per la costruzione del rilevato arginale devono avere caratteristiche fisiche e meccaniche adeguate a renderlo stabile e a trattenere e contenere l'acqua.



LA TIPOLOGIA DEI MATERIALI CONDIZIONA LA FORMA DELLA SEZIONE.

Materiali di natura ARGILLOSA E LIMOSA, compresi tra il tipo **A6** della classificazione CNR-UNI 10006, con contenuto minimo in sabbia del 15% ed il tipo **A4**, con contenuto massimo in sabbia del 50%;

Caratteristiche di bassa permeabilità;

Media o bassa plasticità;

Con struttura stabile nei confronti dei problemi di imbibizione e fessurazione per rigonfiamento;

In grado di garantire un sufficiente grado di sicurezza nei confronti della stabilità e al contempo di adattarsi ai cedimenti del terreno di fondazione.

I RILEVATI ARGINALI – Aspetti generali

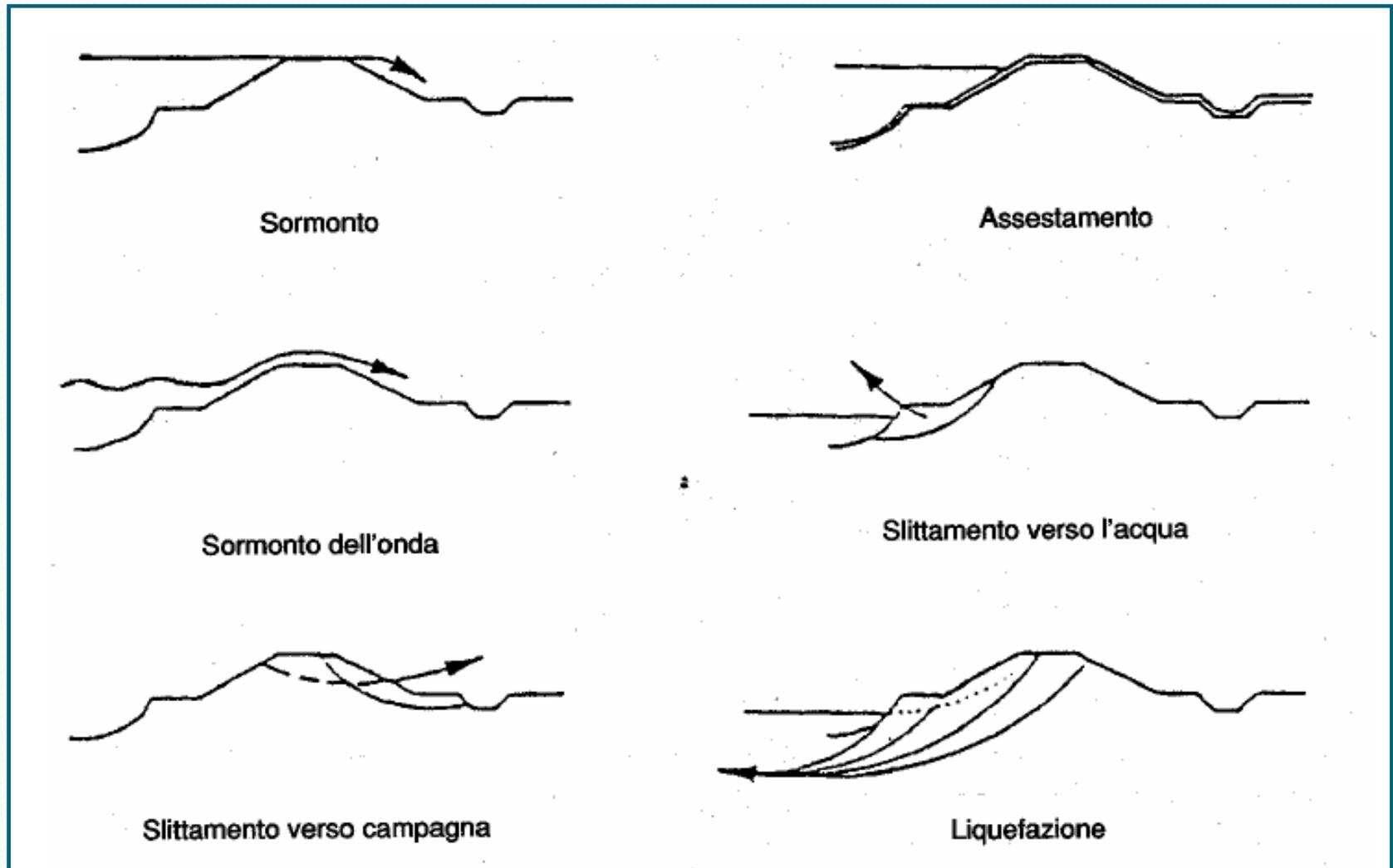
I MATERIALI DA COSTRUZIONE

Il materiale è usualmente posto in opera in strati di 30-35 cm e successivamente compattato, facendo riferimento alla densità ottenuta con l'energia Proctor Standard nelle prove di laboratorio.



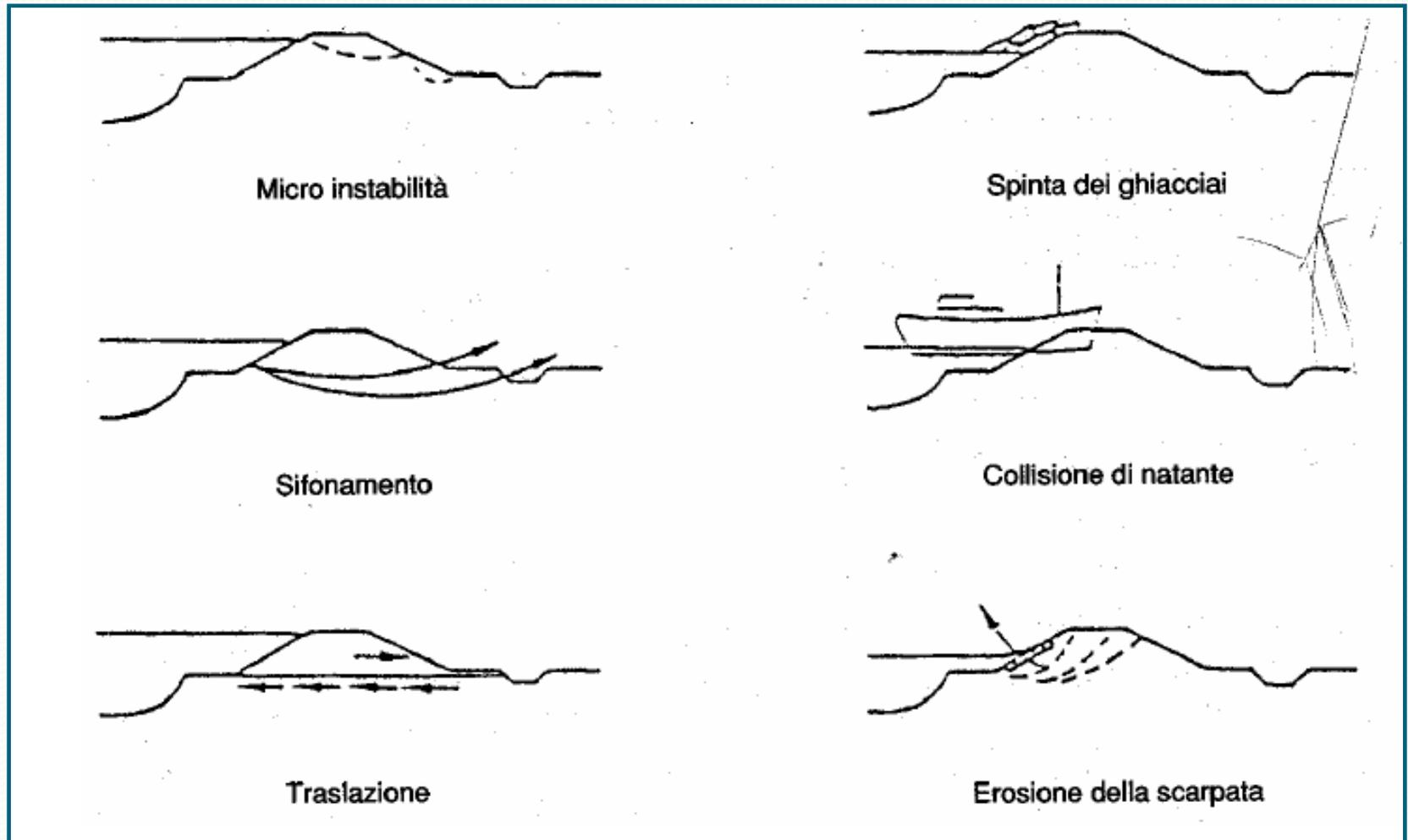
I RILEVATI ARGINALI

PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA DEI CORPI ARGINALI



I RILEVATI ARGINALI

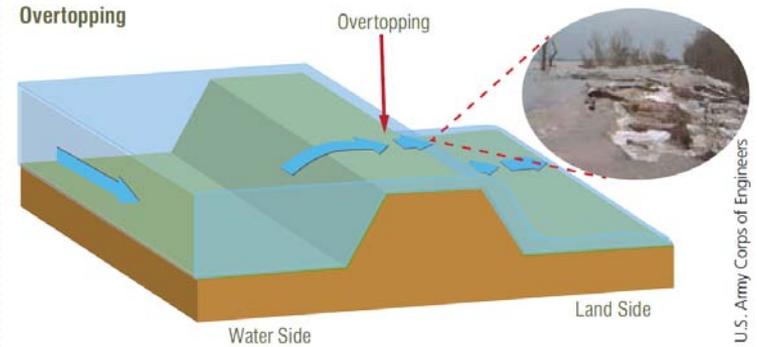
PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA DEI CORPI ARGINALI



I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

A

SORMONTO (OVERTOPPING)

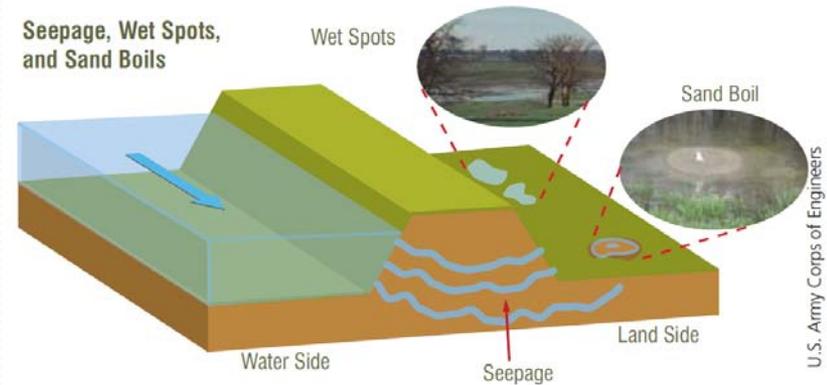


B

ROTTURA IDRAULICA - SIFONAMENTO

C

EROSIONE INTERNA O PIPING



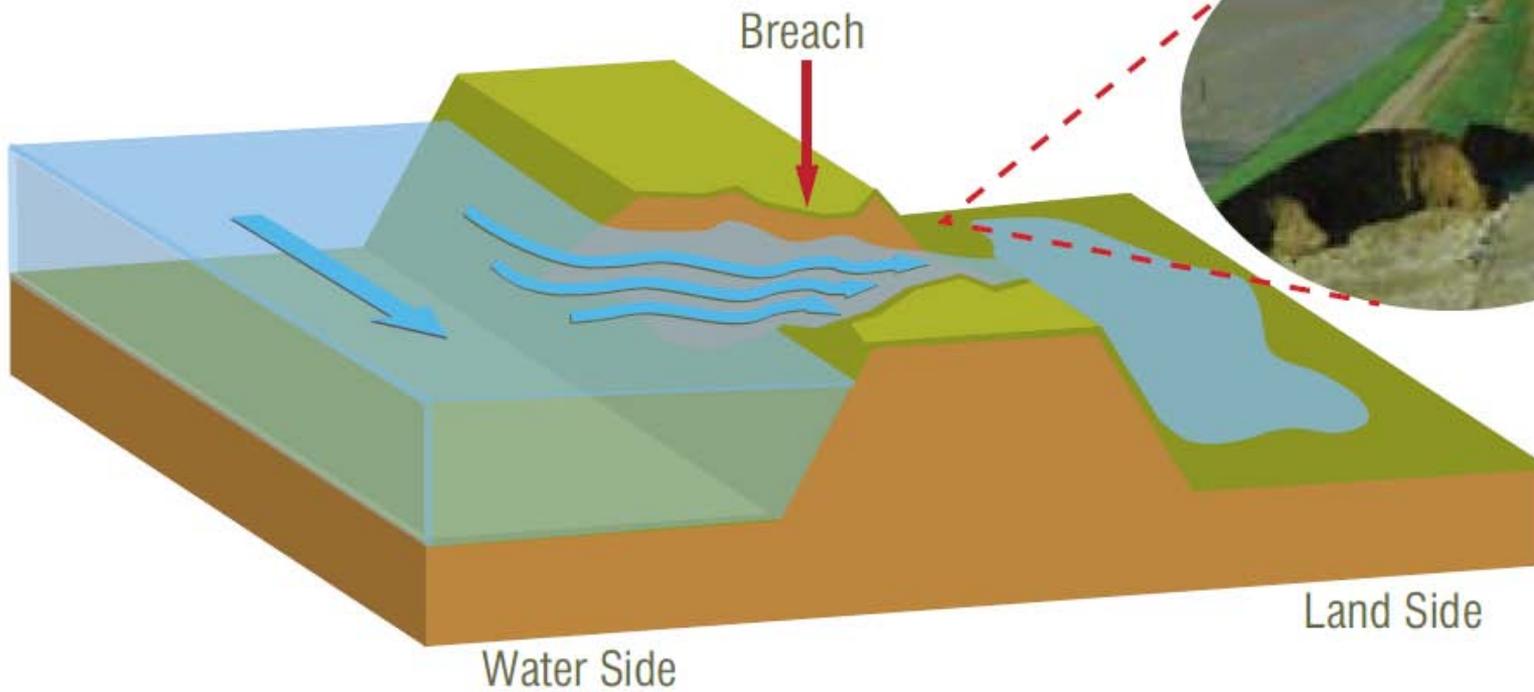
D

ROTTURA MECCANICA

→ Instabilità
→ Cedimenti

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

Breaching



I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

Le azioni che possono creare condizioni di instabilità delle sponde si possono dividere in due categorie:

1 AZIONI ESTERNE → Dovute all'erosione ed allo scalzamento della scarpata per effetto della corrente.

2 AZIONI INTERNE → Causate dai moti di filtrazione alimentati dalle falde, dagli eventi meteorici e dalle variazioni del livello nel corso d'acqua.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

1 AZIONI ESTERNE

L'AZIONE DI TRASPORTO DELLA CORRENTE sulle particelle di terreno è usualmente valutata sulla base di correlazioni tra le dimensioni delle particelle granulari, il loro peso specifico e la velocità della corrente, oppure lo sforzo di taglio nell'interno che dà luogo al movimento della particella stessa.



Le relazioni più semplici si basano sull'equilibrio alla rotazione e alla traslazione di elementi prismatici soggetti all'azione della corrente e sono del tipo:

$$v_{crit} = 4 \div 5 vD \quad (\text{m/s; m}).$$

Il fenomeno di trasporto riguarda i **materiali a grana grossa privi di coesione** mentre i terreni a grana fine argillosi sono più resistenti all'azione erosiva e sono soggetti a trasporto solo se alterati e disgregati per effetto della imbibizione e delle alternanze umido – secco.

Per i terreni coesivi l'azione erosiva diviene significativa per velocità dell'ordine di 0.8 m/s, per argille di media consistenza, e di 1.5 m/s, per argille compatte.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

1 AZIONI ESTERNE

INTERVENTI PER LA PROTEZIONE DALL'EROSIONE E DALLO SCALZAMENTO E PER MIGLIORARE LA STABILITÀ DELLE SCARPATE

CRITERI DI PROGETTO →

Prevedono di realizzare, al piede e lungo la sponda, rivestimenti e opere di sostegno che favoriscono anche il drenaggio delle acque di filtrazione. Es. scogliere in pietrame; gabbioni e materassi riempiti di ciottoli e pietrame.

Particolare cura →

PROTEZIONE AL PIEDE DELLA SCARPATA:

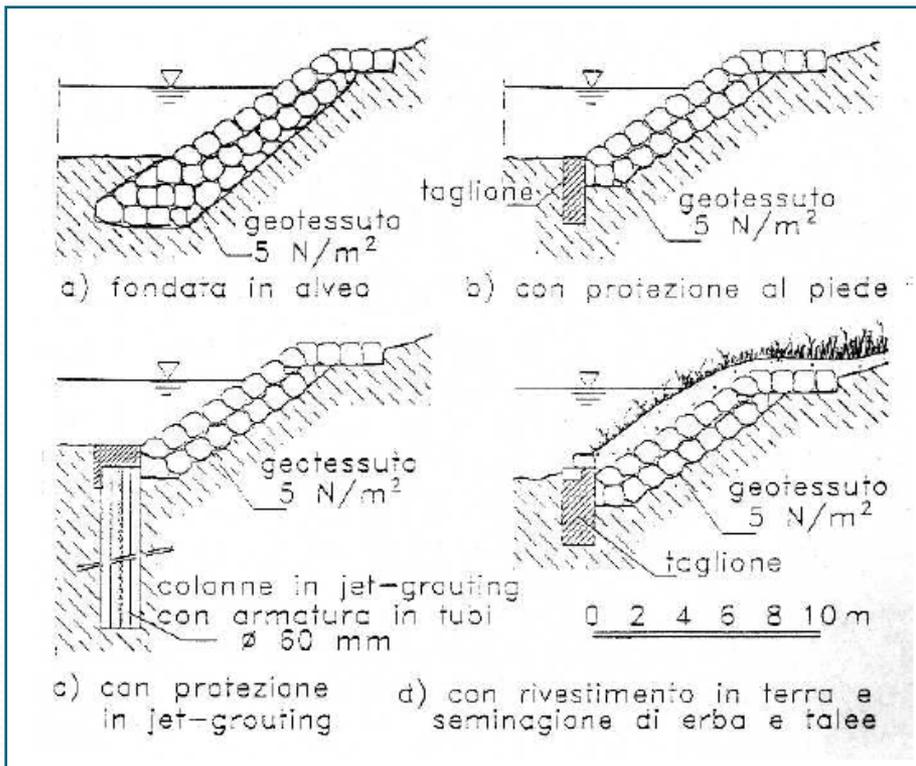
- La scogliera viene immorsata al disotto del fondo dell'alveo;
- Si realizzano un taglione in calcestruzzo o colonne in terra stabilizzata con il metodo jet-grouting.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

1 AZIONI ESTERNE

INTERVENTI PER LA PROTEZIONE DALL'EROSIONE E DALLO SCALZAMENTO E PER MIGLIORARE LA STABILITÀ DELLE SCARPATE

IMPATTO AMBIENTALE →



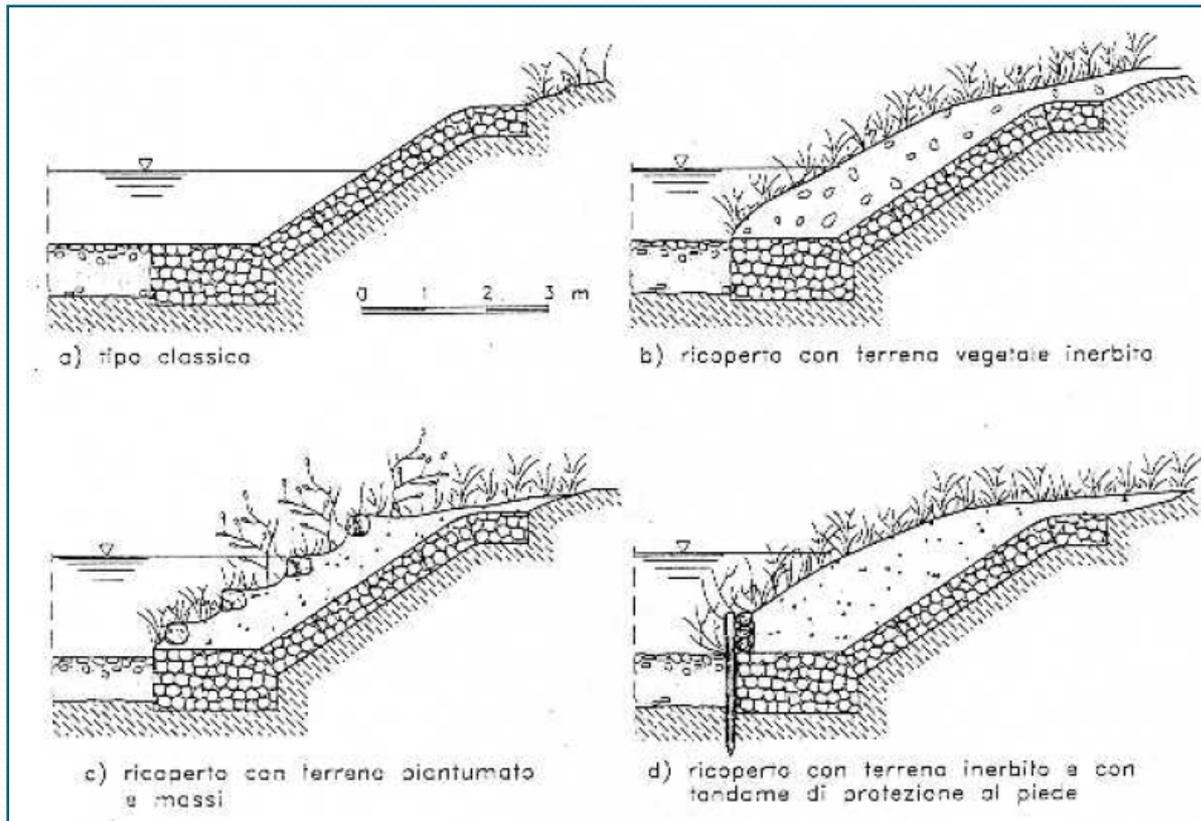
La protezione in massi di pietrame o in gabbioni può essere completata con il ricoprimento con terreno vegetale, seminazione e talee.

Nei tratti montani dei corsi d'acqua vengono utilizzate altre opere di sostegno, in grado di inserirsi bene nell'ambiente, come i cribb walls o muri cellulari, realizzati con strutture formate da elementi prefabbricati in legno, ferro o cemento, riempiti di terra e pietrame.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

1 AZIONI ESTERNE

INTERVENTI PER LA PROTEZIONE DALL'EROSIONE E DALLO SCALZAMENTO E PER MIGLIORARE LA STABILITÀ DELLE SCARPATE

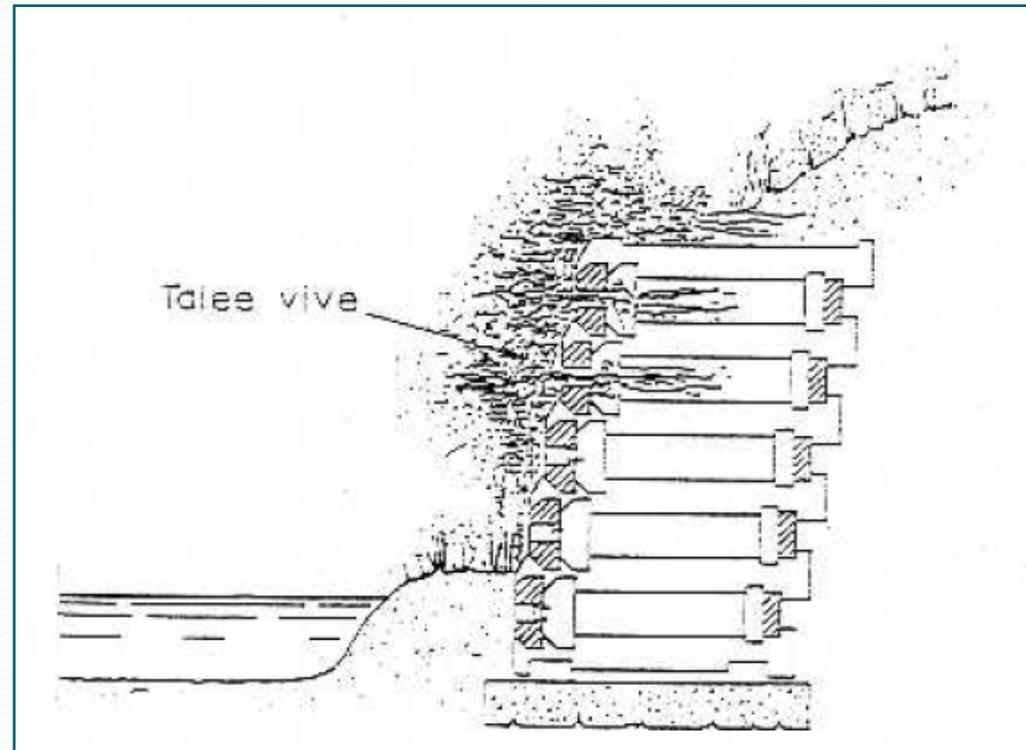
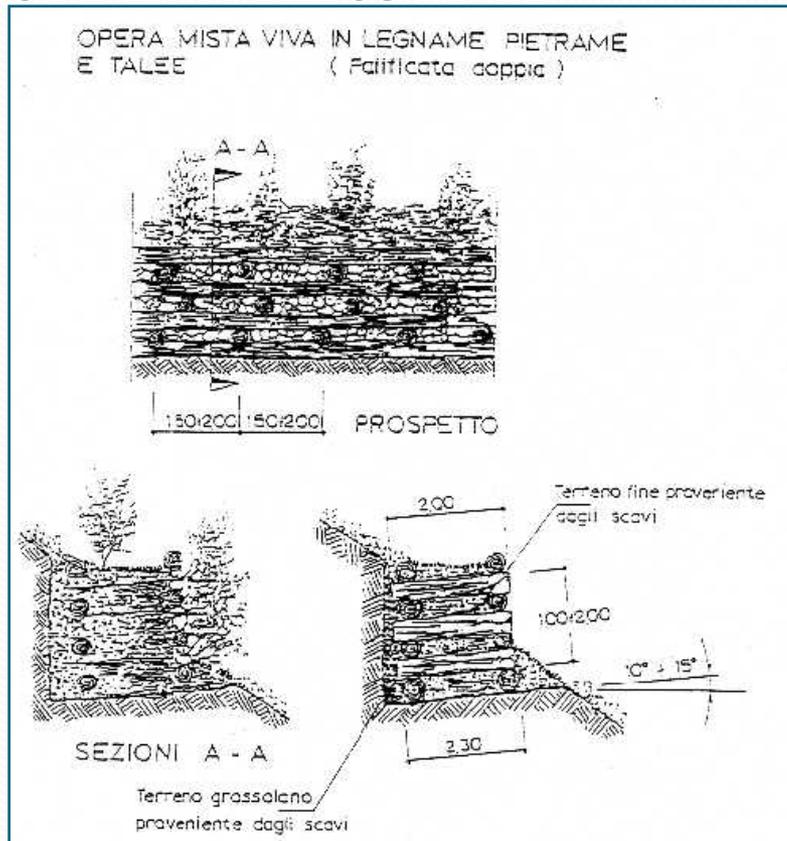


Difesa di sponda in gabbioni. (Da Deppo et Alii, 2000)

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

1 AZIONI ESTERNE

INTERVENTI PER LA PROTEZIONE DALL'EROSIONE E DALLO SCALZAMENTO E PER MIGLIORARE LA STABILITÀ DELLE SCARPATE



I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

1 AZIONI ESTERNE

INTERVENTI PER LA PROTEZIONE DALL'EROSIONE E DALLO SCALZAMENTO E PER MIGLIORARE LA STABILITÀ DELLE SCARPATE

AREE FORTEMENTE ANTROPIZZATE →

Non c'è la possibilità di aumentare le sezioni di flusso o di dare un'adeguata pendenza alle sponde o alle arginature di contenimento.



I muri in calcestruzzo costituiscono un struttura di sostegno delle scarpate molto utilizzata.

I muri possono essere a gravità, a sbalzo o a contrafforti e la loro progettazione si basa sulle teorie classiche per la valutazione delle spinte delle terre.

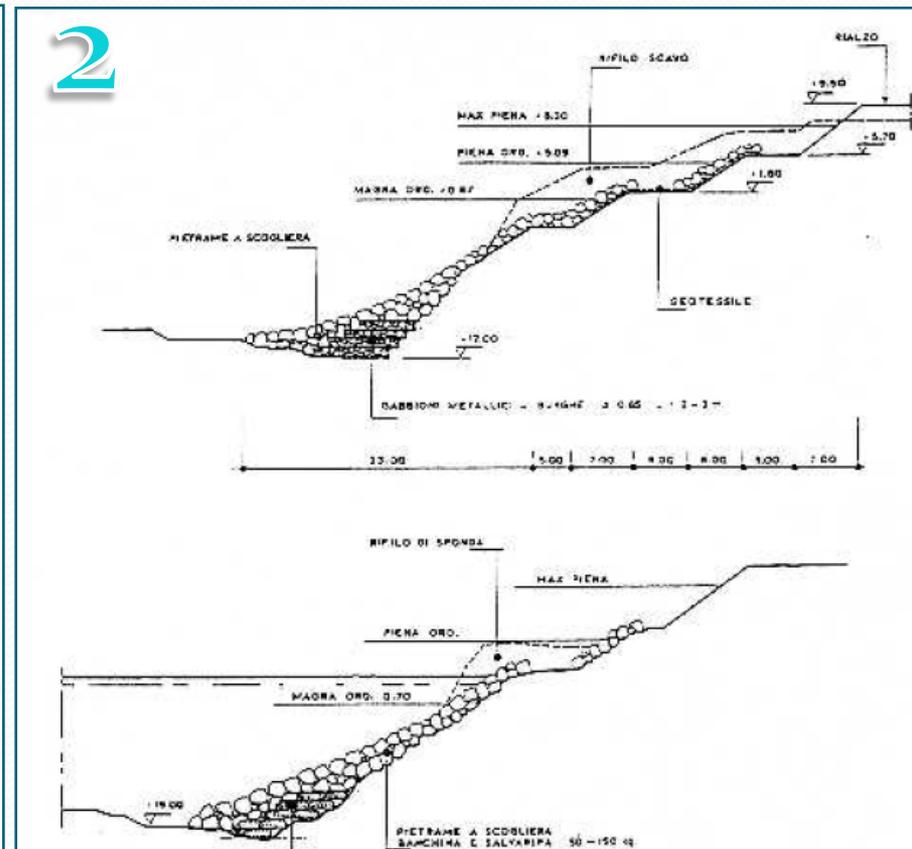
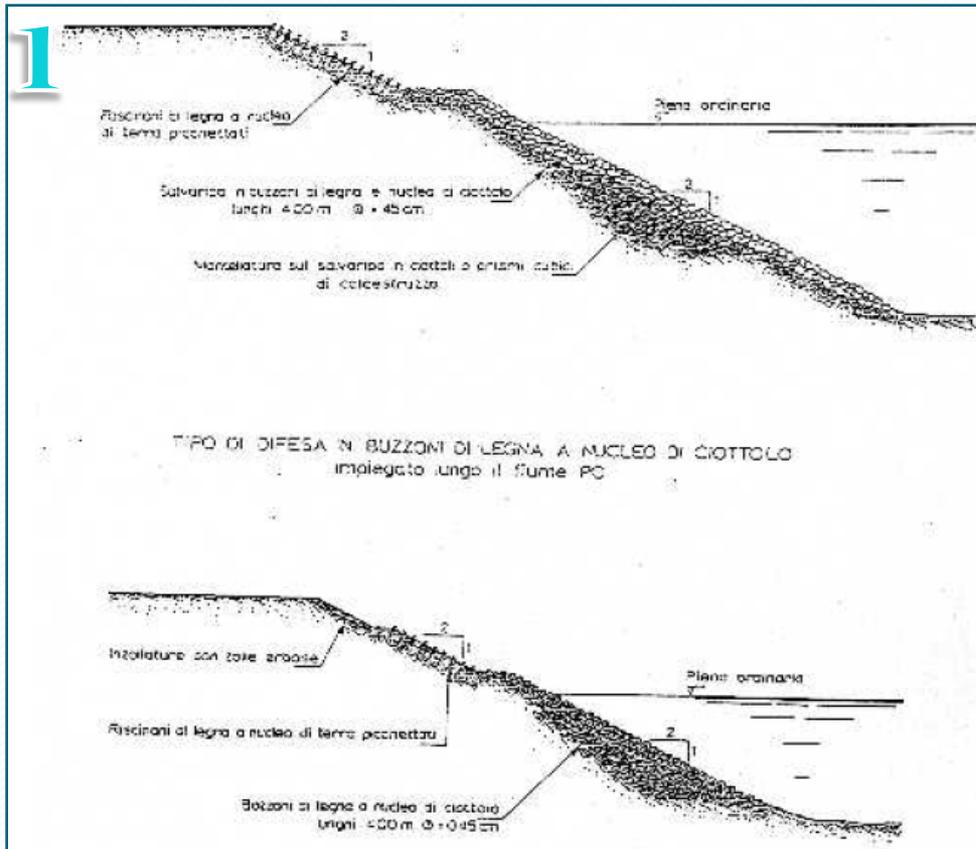
La struttura deve resistere con il peso proprio e con quello del terreno interessato, allo scivolamento e al ribaltamento e il terreno di fondazione deve assicurare un'adeguata capacità portante.

In presenza di terreni di fondazione non idonei è spesso necessario il ricorso a fondazioni profonde su pali.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

1 AZIONI ESTERNE

INTERVENTI PER LA PROTEZIONE DALL'EROSIONE E DALLO SCALZAMENTO E PER MIGLIORARE LA STABILITÀ DELLE SCARPATE

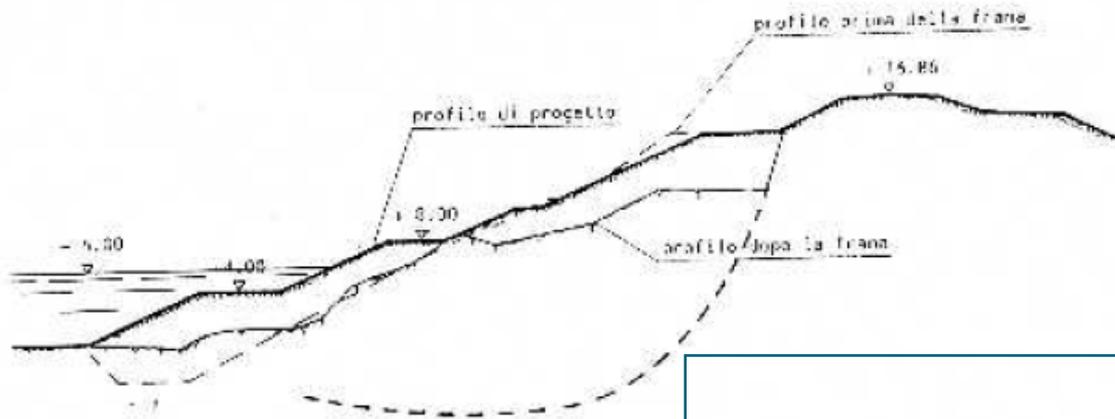


Difesa di sponda degli argini del Po. 1. C. Sup. Ispezione per il Po, 1929; 2. Attuali.

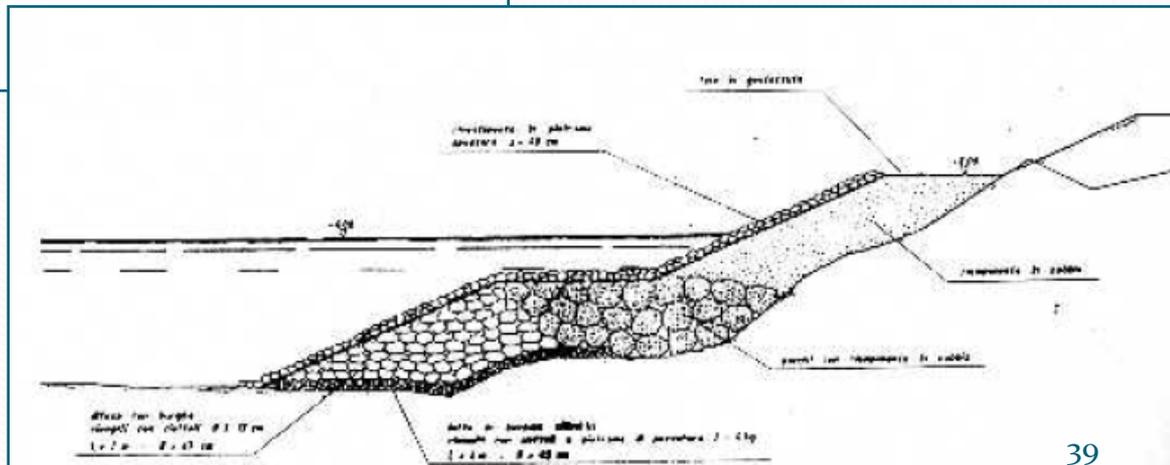
I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

1 AZIONI ESTERNE

INTERVENTI PER LA PROTEZIONE DALL'EROSIONE E DALLO SCALZAMENTO E PER MIGLIORARE LA STABILITÀ DELLE SCARPATE



Frana argine in froldo in destra Po a Felonica (23/07/1995) e intervento di sistemazione al piede.



I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione

La presenza, in occasione di eventi di piena, di un eccesso di pressione neutrale nel terreno di fondazione, al piede dell'argine o nelle zone a campagna, può dar luogo al fenomeno del sifonamento con il possibile collasso del rilevato e la creazione dei fontanazzi.

Il SIFONAMENTO a campagna costituisce il principale pericolo per la stabilità e la sicurezza delle arginature di contenimento.

Questo fenomeno si presenta particolarmente in terreni di fondazione formati da strati di materiali incoerenti permeabili e particolarmente, in quelli a granulometria più sottile (sabbie e limi).

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

MOTI DI FILTRAZIONE E PRESSIONI NEUTRALI NEL CORPO ARGINALE E NEL TERRENO DI FONDAZIONE

**PROBLEMA
PROGETTUALE**



Rappresentare in maniera corretta la rete di flusso in funzione della PERMEABILITÀ dei materiali costituenti l'argine e il terreno di fondazione.

Condizioni di flusso e pressioni neutrali possono variare sensibilmente in presenza di terreni di fondazione permeabili e tenendo conto dell'anisotropia caratteristica del coefficiente di permeabilità.

Schematizzazione della
RETE DI FLUSSO in
MOTO PERMANENTE



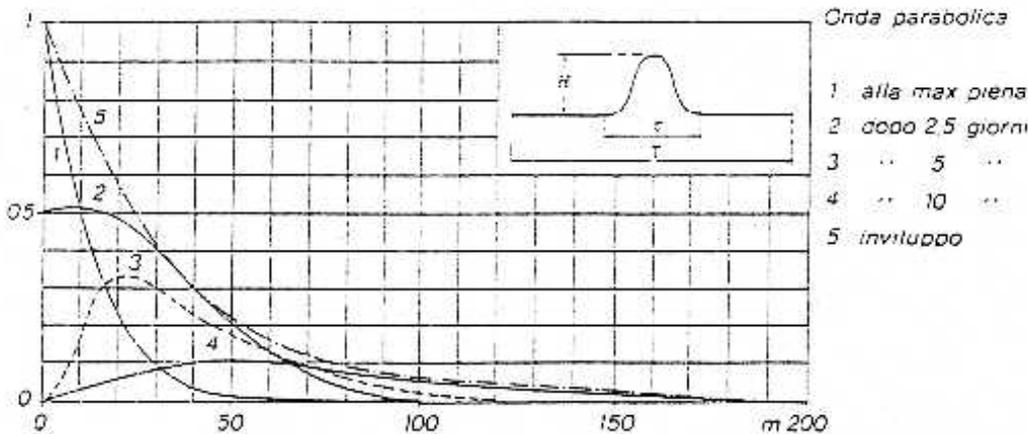
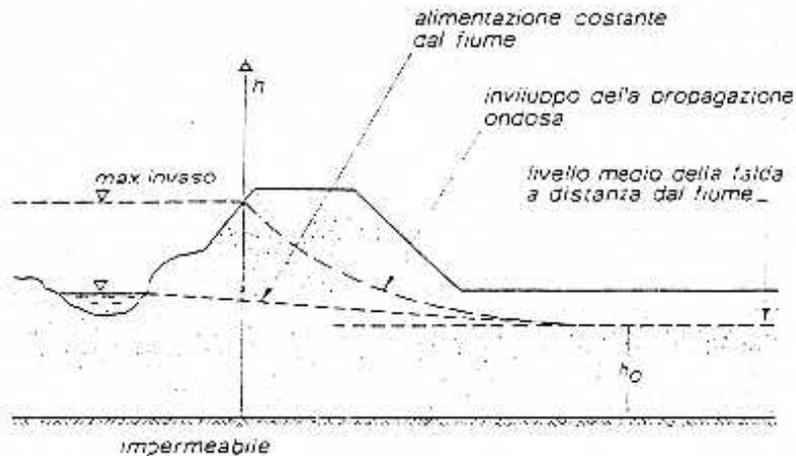
Non considera che gli argini e parte dei terreni di fondazione sono interessati dall'acqua solo per tempi limitati e con livelli variabili nel tempo, abbastanza rapidamente secondo l'onda di piena.



È opportuno valutare il *flusso in*
condizioni di MOTO VARIO (Supino,1955).

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

MOTI DI FILTRAZIONE E PRESSIONI NEUTRALI NEL CORPO ARGINALE E NEL TERRENO DI FONDAZIONE



Flusso in condizioni di MOTO VARIO (Supino, 1955).

Considera un'onda di piena di altezza H , formata dalla intersezione di quattro parabole, di durata t rispetto al tempo T riferito a un anno, che si propaga attraverso l'argine e assume diverse configurazioni, in funzione della porosità n , del coefficiente di permeabilità K e dello spessore h_0 (nella figura: $n = 0.35$, $K = 2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, $h_0 = 10 \text{ m}$, $t = 10 \text{ gg}$ e $T = 365 \text{ gg}$).

N.B. La linea di inviluppo è più bassa della linea di saturazione corrispondente al moto permanente e a quella stimata in maniera empirica con pendenza $1:5 \div 1:6$. (D'Amico, 1963; Colleselli, 1993).

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

MOTI DI FILTRAZIONE E PRESSIONI NEUTRALI NEL CORPO ARGINALE E NEL TERRENO DI FONDAZIONE

Il rilevato arginale è soggetto a cicli di IMBIBIZIONE ED ESSICCAMENTO.



Lo studio della filtrazione deve tener conto del diverso comportamento, della modifica delle permeabilità e delle proprietà meccaniche legate alle variazioni:

- del **CONTENUTO D'ACQUA**;
- del **GRADO DI SATURAZIONE**;
- della **PRESSIONE DELL'ACQUA E DELL'ARIA** nei pori.

SUZIONE MATRICIALE o SUZIONE = legame o curva caratteristica fra contenuto d'acqua e differenza fra la pressione dell'aria e dell'acqua.

L'effetto della suzione è maggiore per i terreni a grana fine limosi ed argillosi e presenta un andamento fortemente isteretico nei percorsi di imbibizione ed essiccamento.



Un'analisi completa del moto di filtrazione in condizioni di moto vario deve tener conto dell'anisotropia della permeabilità e della sua dipendenza dal grado di saturazione, della curva caratteristica e del suo andamento isteretico.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione

Dal punto di vista della stabilità le ZONE AL PIEDE DELLA SCARPATA risultano quelle maggiormente instabili e necessitano quindi di particolare cura nel progetto dei provvedimenti di protezione e stabilizzazione.

Gli interventi volti a migliorare le condizioni di stabilità delle sponde hanno **DUE FINALITÀ**:

L'AUMENTO DELLA PRESSIONE EFFICACE

Ad es. disponendo sulla scarpata un sovraccarico, formato con materiale più permeabile, come una scogliera in pietrame, tale da non modificare il regime del flusso.

LA DIMINUZIONE DELLE PRESSIONI NEUTRE

Strettamente legata all'abbassamento del livello della falda nel pendio, comporta un aumento della tensione efficace e quindi della resistenza al taglio.

Lungo le scarpate degli argini fluviali, di norma, non si eseguono interventi di abbattimento e controllo della falda, con trincee e tubi drenanti come nel caso dei pendii instabili, perché questi possono pregiudicare la funzionalità e la tenuta idraulica delle scarpate naturali e artificiali durante le piene.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

Gli interventi di protezione idraulica contro **IL PERICOLO DI SIFONAMENTO**, consistono nella costruzione di setti impermeabili di vario tipo:

- **DIAFRAMMI IN C.A. O PLASTICI;**
- **DIAFRAMMI IN COLONNE O LAME IN JET GROUTING;**
- **PALANCOLATI METALLICI.**

Tali setti sono ubicati al piede a fiume o all'interno del corpo arginale, e sono spinti, parzialmente o totalmente, sino a strati argillosi profondi, in modo da confinare gli strati permeabili.

Altri tipi di interventi riguardano la impermeabilizzazione del paramento a fiume con lastre in c.a., manti bituminosi o geocompositi, oppure il rinforzo dell'argine a campagna con la costruzione di nuove banche.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

I principali strumenti di controllo della filtrazione attraverso i terreni di fondazione, per evitare i problemi di sifonamento, indicati dall'U.S Army Corps of Engineering, sono:

- A. TAGLIONI (Cutoff trenches);
- B. RIVESTIMENTO LATO FIUME CON MATERIALE IMPERMEABILE (riverside impervious blankets);
- C. BERME;
- D. TRINCEE PERMEABILI AL PIEDE DEL RILEVATO (pervious toe trenches);
- E. POZZI DI SFOGO DELLA PRESSIONE (pressure relief wells).

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

A **TAGLIONI (Cutoff trenches)** → SISTEMA PIÙ EFFICACE

Bloccano la filtrazione, al di sotto del rilevato arginale, attraverso terreni di fondazione permeabili.

Realizzati mediante lo scavo, al piede del rilevato, lato fiume, di una trincea riempita con:

TERRA COMPATTATA

CEMENTO → COSTO SPESSO MINORE

Affinché sia efficace, il taglione dovrebbe penetrare approssimativamente fino a coprire almeno il **95% dello spessore dello strato permeabile**.

Per questa ragione esso non è economicamente vantaggioso quanto deve raggiungere profondità maggiori di **12.2 m (40 ft)**.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

B RIVESTIMENTO LATO FIUME CON MATERIALE IMPERMEABILE

Gli argini sono frequentemente situati su terreni di fondazione aventi uno strato di copertura di materiale fine impermeabile o semimpermeabile che ricopre sabbia e ghiaia; se tale strato superficiale è esteso e continuo, costituisce un buon sistema per il controllo della filtrazione: esso può ridurre il flusso e la pressione lato terra.

Perché esso sia efficace è necessario che:

- abbia spessore adeguato;
- sia adeguatamente esteso a partire dal rilevato lato fiume;
- sia adeguatamente protetto dall'erosione;
- abbia opportuna permeabilità.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

C **BERME (Landside seepage berms)**

SEMPLICI DA COSTRUIRE

RICHIEDONO POCA MANUTENZIONE

MIGLIORANO E BONIFICANO L'AREA

Costituiscono una protezione contro l'instabilità del rilevato arginale lato terra.

Se la pressione neutra lato terra nei depositi permeabili al disotto di uno strato impermeabile diventa maggiore della tensione efficace dello strato superficiale si può verificare un sollevamento di quest'ultimo e la formazione di bolle di sabbia.

La costruzione lato terra di berme può eliminare il problema:

SOVRACCARICO

COMPENSA L'INNALZAMENTO
DELLE FORZE DI FILTRAZIONE

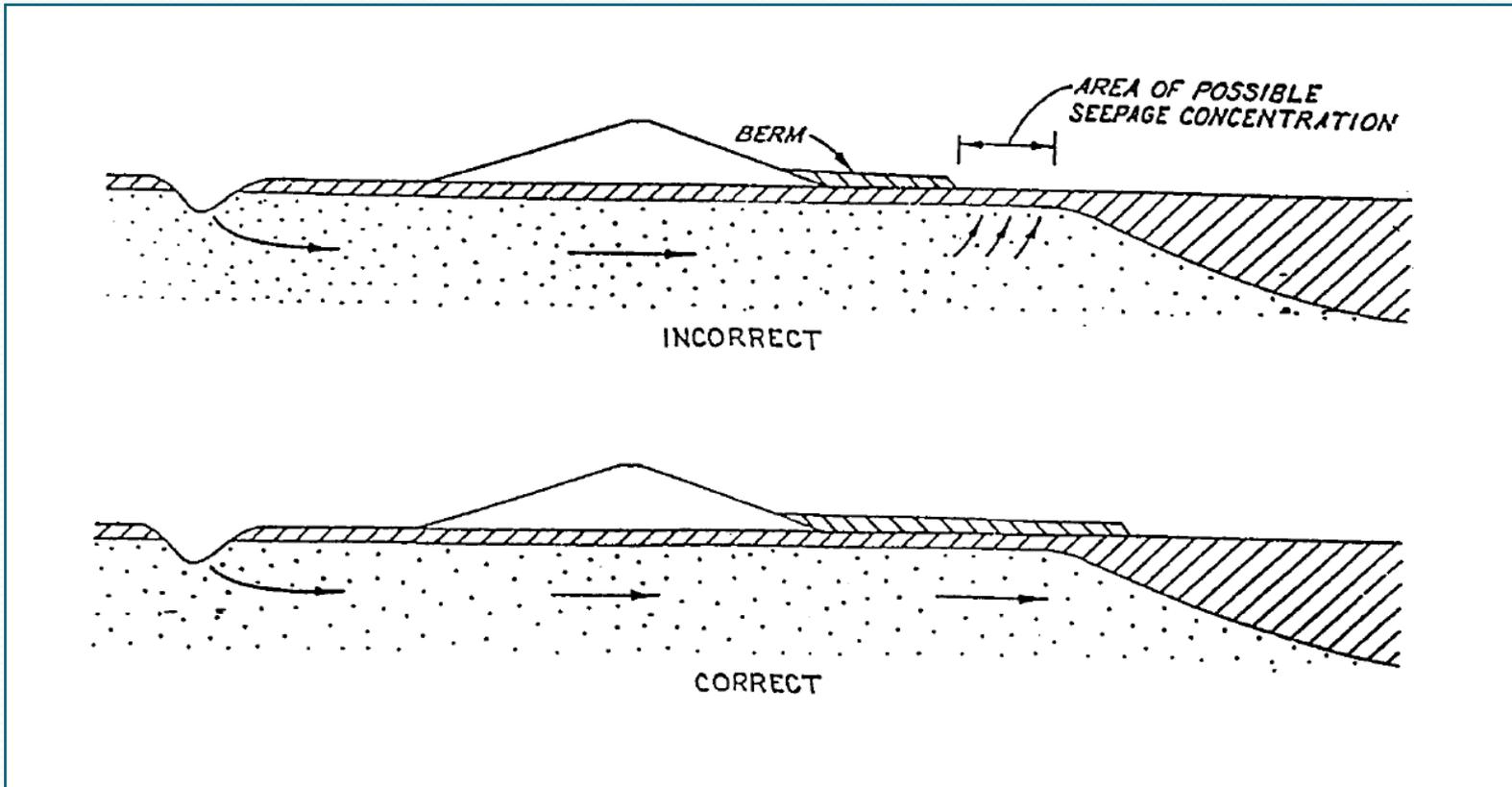
MAGGIORE LUNGHEZZA

IMPONE LA RIDUZIONE DELLE
SOVRAPRESSIONI AL PIEDE

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

C BERME (Landside seepage berms)

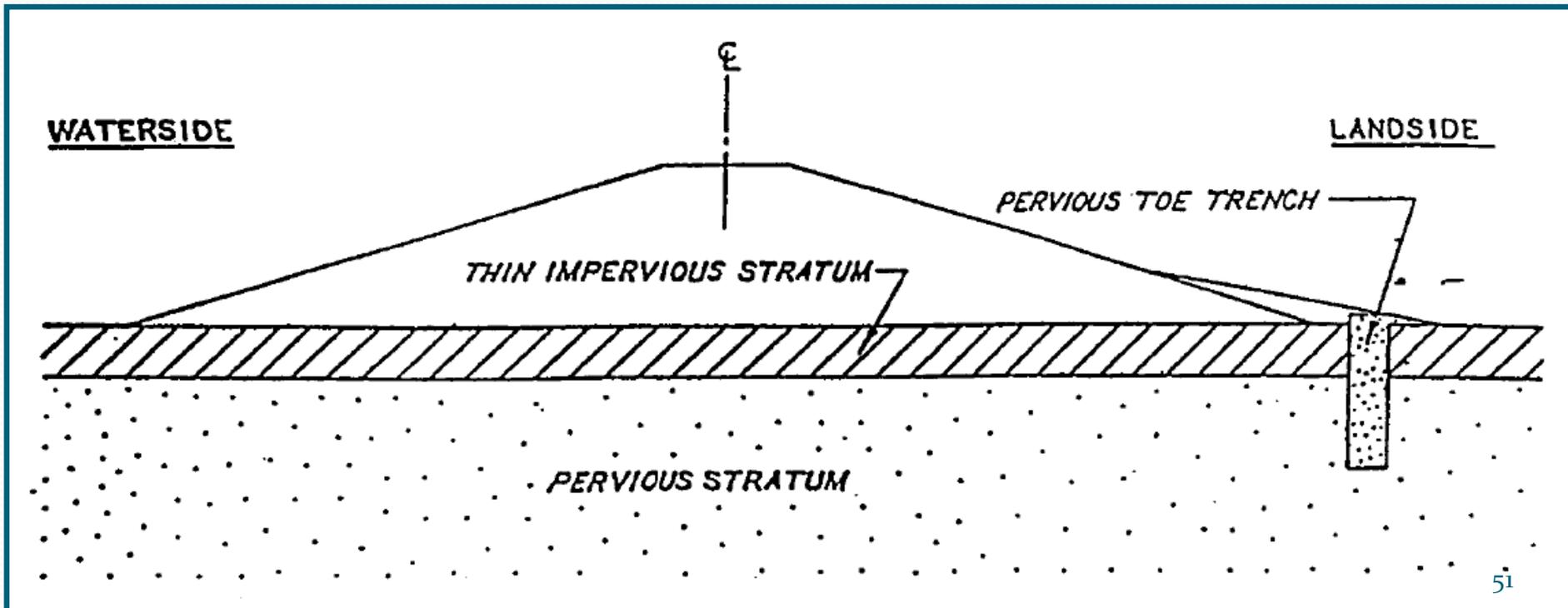


I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

D TRINCEE PERMEABILI AL PIEDE DEL RILEVATO (Pervious toe trenches)

Hanno lo scopo di controllare la filtrazione superficiale e proteggere l'area in prossimità del piede del rilevato arginale.



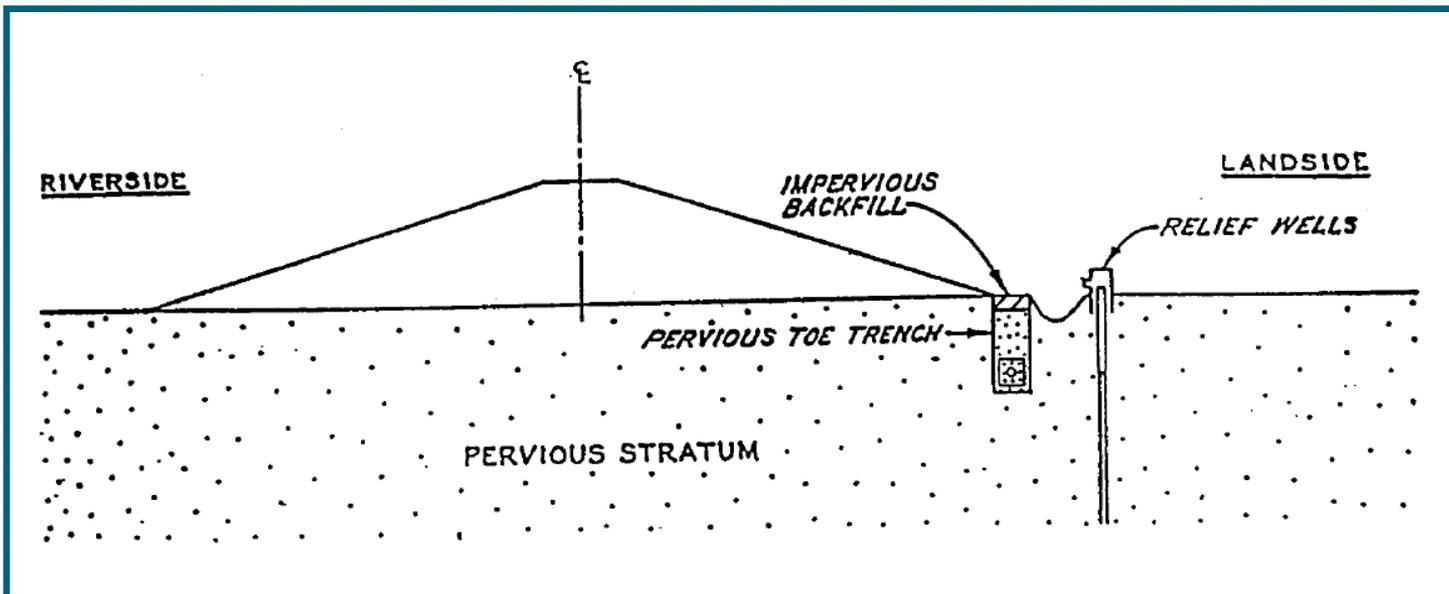
I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

D TRINCEE PERMEABILI AL PIEDE DEL RILEVATO (Pervious toe trenches)

Possono essere utilizzate unitamente a pozzi, in tal caso le prime intercettano il flusso di filtrazione superficiale, i secondi quello più profondo.

Spesso, a seconda dell'entità della filtrazione e della localizzazione dell'argine, sono provviste di un collettore forato per convogliare il flusso.

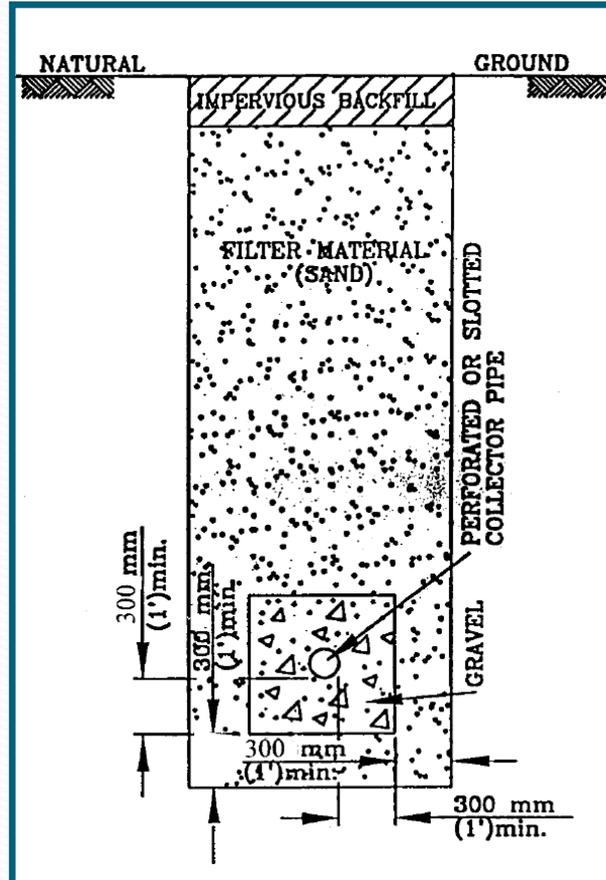


I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

D TRINCEE PERMEABILI AL PIEDE DEL RILEVATO (Pervious toe trenches)

TRINCEA PERMEABILE
CON COLLETTORE:
SEZIONE TIPICA

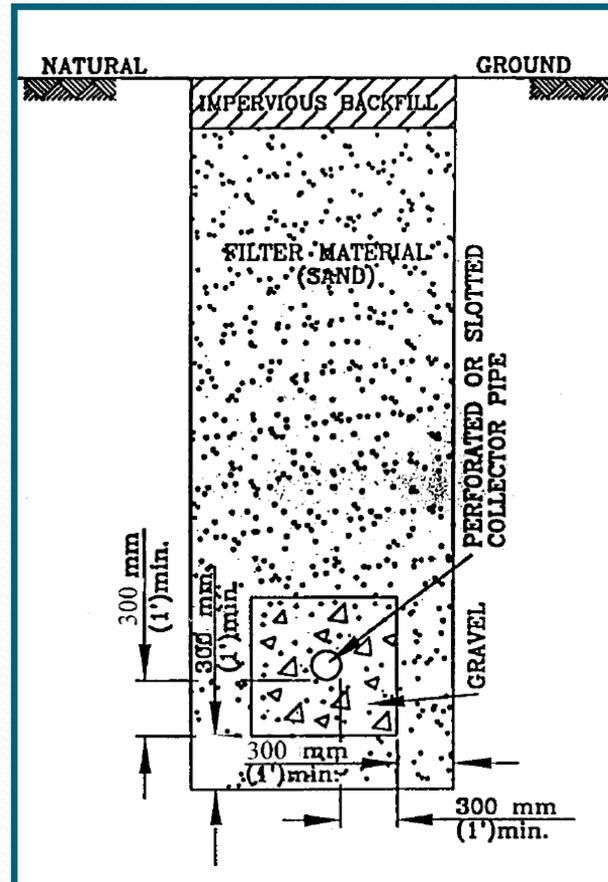


I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

D TRINCEE PERMEABILI AL PIEDE DEL RILEVATO (Pervious toe trenches)

TRINCEA PERMEABILE
CON COLLETTORE:
SEZIONE TIPICA



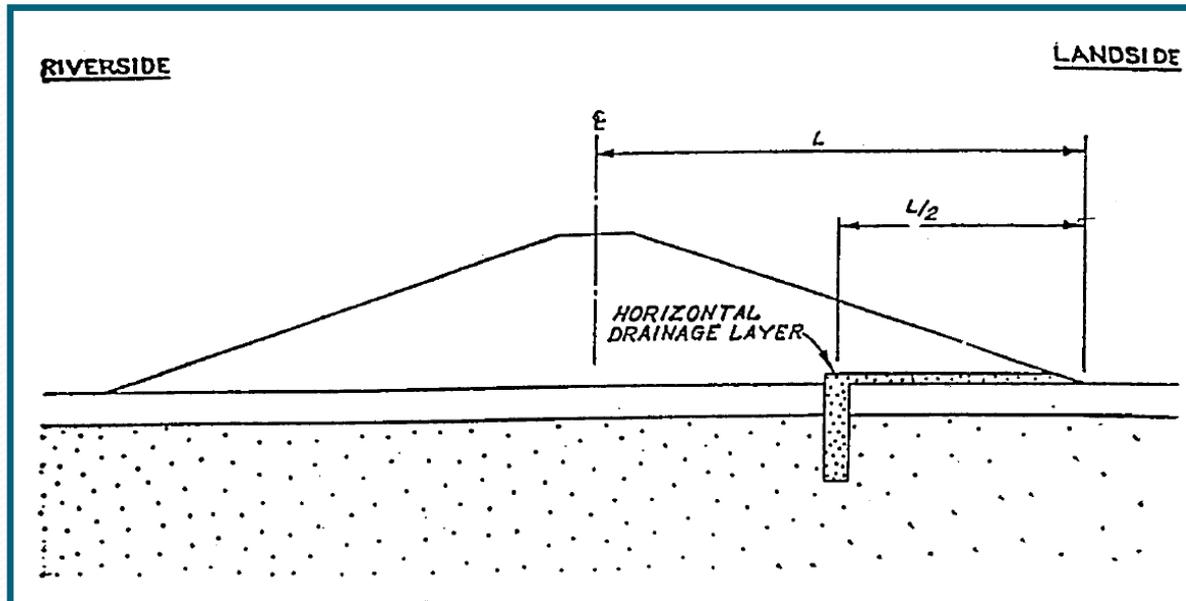
I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

D TRINCEE PERMEABILI AL PIEDE DEL RILEVATO (Pervious toe trenches)

Ubicazione.

Sono localizzate, in genere, al piede dell'argine, ma, a volte, sono costruite al di sotto del pendio di valle del rilevato arginale. Questa soluzione presenta dei vantaggi nel caso in cui la trincea serva anche da ispezione e perché lo strato drenante permeabile orizzontale può aiutare a controllare la filtrazione attraverso il rilevato.



I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

D TRINCEE PERMEABILI AL PIEDE DEL RILEVATO (Pervious toe trenches)

Geometria.

Dipende dal volume di filtrazione che ci si aspetta, dalla riduzione di pressione che si intende raggiungere, dalla pratica costruttiva, dalla stabilità del materiale in cui si opera lo scavo. La larghezza delle trincee varia da 0.61 a 1.83 m (da 2 a 6 ft).

Materiale di riempimento.

È costituito da sabbia che deve soddisfare determinati requisiti.

Il collettore deve essere circondato da uno strato di spessore di 1 ft (circa 305 mm) di ghiaia di granulometria idonea a garantire una transizione equilibrata tra la sabbia di riempimento e i fori del tubo. Il riempimento della trincea deve essere fatto in modo da minimizzare l'effetto di segregazione e la sua compattazione deve essere limitata in modo da non pregiudicare la permeabilità della trincea.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

E POZZI DI SFOGO DELLA PRESSIONE (Pressure relief wells)

Sono utilizzati dove gli strati permeabili sottostanti il rilevato hanno profondità o spessori troppo elevati per essere raggiunti da taglioni o dreni.

Essi possono essere facilmente estesi se con la loro installazione iniziale non si ottiene il controllo richiesto.

Devono essere resistenti alla corrosione, ai batteri del terreno, alle incrostazioni di carbonato e richiedono periodica manutenzione per evitare perdite.

La loro progettazione comporta la definizione del distanziamento, della misura e della profondità.

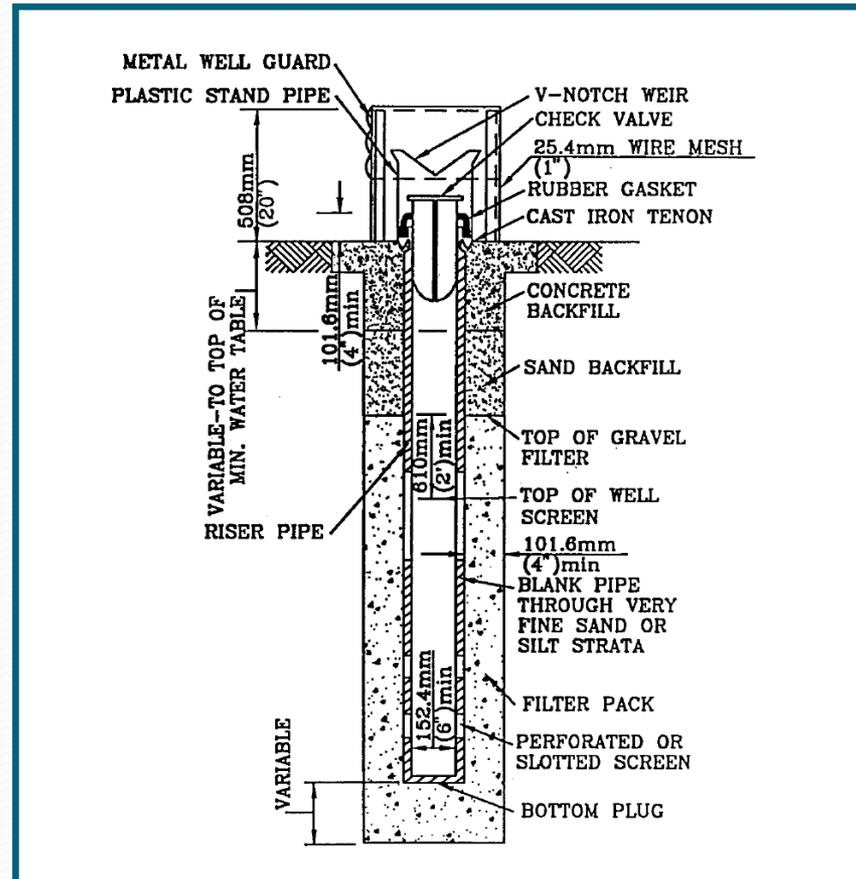
I fattori che devono essere presi in considerazione sono:

- la profondità, le stratificazioni e la permeabilità dei terreni di fondazione;
- la distanza dalla fonte del moto di filtrazione;
- le caratteristiche dello strato di terreno superficiale lato terra;
- la diminuzione di pressione neutra che si vuole ottenere.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Sifonamento

E POZZI DI SFOGO DELLA PRESSIONE (Pressure relief wells)



I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Piping

La filtrazione attraverso il rilevato arginale può causare:

- una diminuzione della stabilità del pendio;
- il distacco del pendio;
- il piping: l'erosione interna, di sabbia fine o materiali limosi.

In molti casi, gli elevati quantitativi d'acqua non permangono a contatto con l'argine per un tempo sufficiente perché il fenomeno si verifichi; ma la possibilità della combinazione di un elevato quantitativo d'acqua e del verificarsi di abbondanti precipitazioni, possono far sì che il fenomeno si verifichi.

Nel caso lato terra siano presenti berme per stabilizzare o per controllare la filtrazione attraverso il terreno di fondazione, queste saranno utili anche per questo scopo.

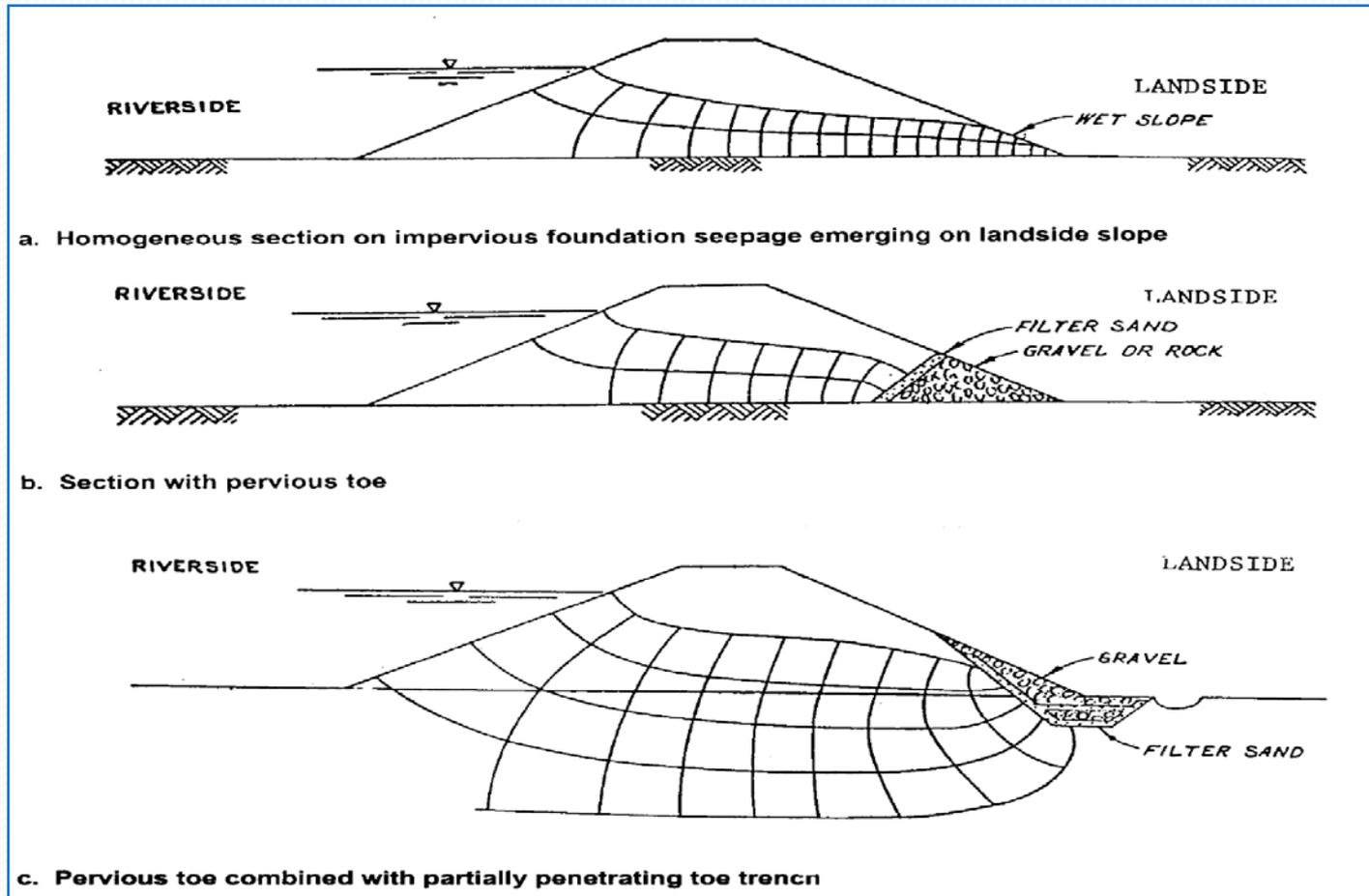
Altrimenti nella sezione dell'argine dovrebbero essere incorporati strati drenanti orizzontali e/o inclinati o dreni al piede del rilevato, per evitare che la filtrazione emerga dal pendio lato terra.

Ciò richiede di selezionare materiale granulare permeabile e comporta un aumento apprezzabile del costo di costruzione dell'argine, a meno che materiale idoneo non sia reperibile in loco.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Piping

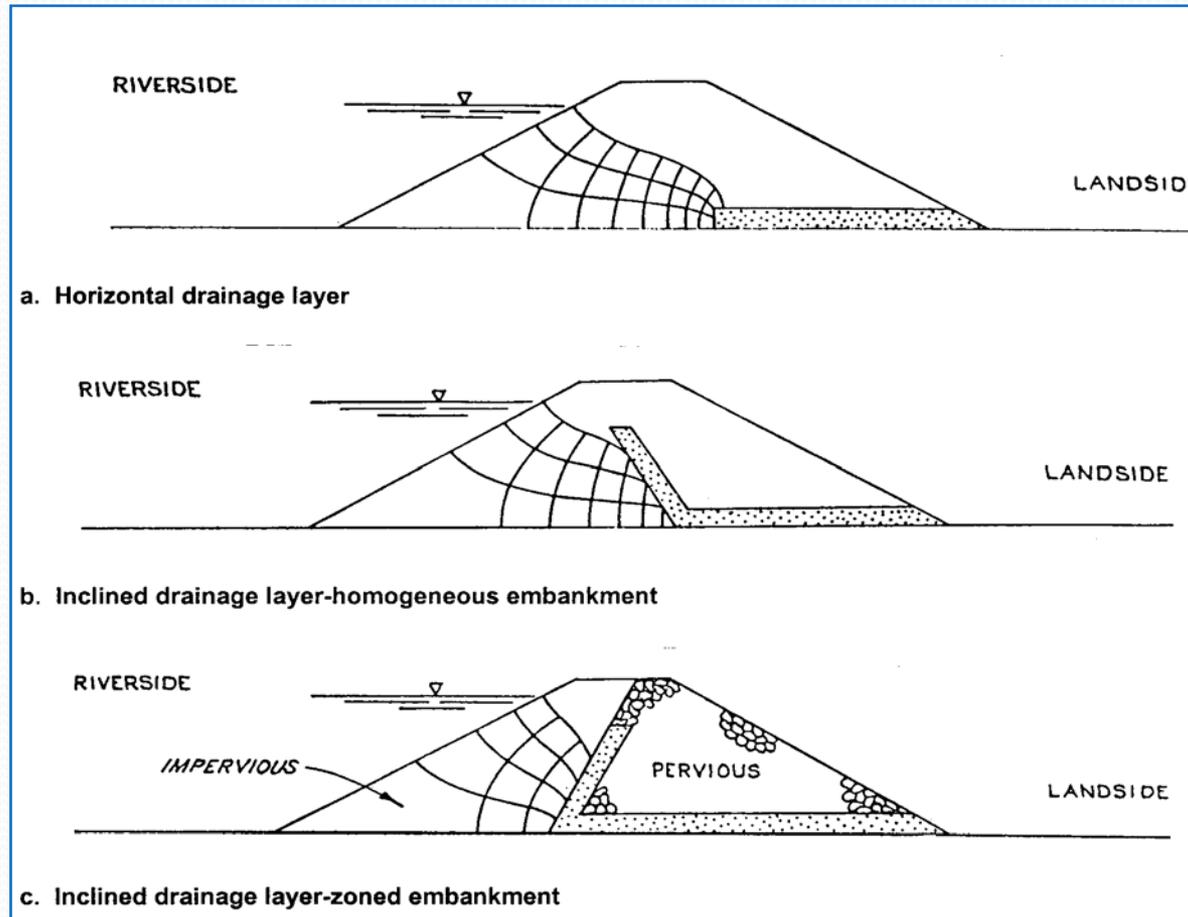
DRENI PERMEABILI AL PIEDE



I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Piping

STRATI DRENANTI ORIZZONTALI E INCLINATI



I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Piping

STRATI DRENANTI ORIZZONTALI E INCLINATI

Strato drenante inclinato

É uno dei migliori metodi di controllo della filtrazione interna: intercetta completamente la filtrazione.

Raramente utilizzato nella costruzione degli argini a causa degli elevati costi → solo per brevi tratti in posizioni importanti (molto usato nelle dighe in terra).

Permette di costruire la porzione di argine lato terra con materiale di qualunque permeabilità.

I dreni inclinati devono essere immorsati in quelli orizzontali.

Se la differenza di granulometria tra i due materiali, permeabile ed impermeabile, è elevata deve essere progettato come un filtro graduato.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione → Piping

Progetto degli strati drenanti. Il progetto dei dreni permeabili al piede e degli strati drenanti orizzontali ed inclinati deve assicurare che essi abbiano **adeguato spessore** e **permeabilità** da trasmettere il flusso di filtrazione senza apprezzabili perdite di carico, e, allo stesso tempo, **prevenire la migrazione di particelle di fine**. Gli strati orizzontali dovrebbero avere uno spessore minimo di 18 in (457.2 mm).

Compattazione degli strati drenanti. La messa in opera e la compattazione deve assicurare il raggiungimento di un'adeguata densità e scongiurare il verificarsi di segregazione e contaminazione. Occorre porre attenzione a non compattare troppo per evitare di ridurre la permeabilità. I rulli vibranti rappresentano i mezzi costipanti più idonei per addensare i materiali non coesivi.

Analisi granulometriche dovrebbero essere condotte prima e dopo la compattazione per assicurarsi che il materiale rispetti le specifiche e non contenga troppo fine.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione

SIFONAMENTO



Per prevenire il fenomeno e progettare gli interventi di messa in sicurezza è necessario:

Individuare in modo corretto il **PROFILO GEOTECNICO** e **L'ANDAMENTO DEGLI STRATI INTERESSATI DALLA FILTRAZIONE.**



Gli argini si sviluppano per grandi lunghezze e su terreni alluvionali.



Le caratteristiche possono variare sensibilmente e non risultano valutabili facilmente con indagini puntuali.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

2 AZIONI INTERNE → Moti di filtrazione

POTENZIALE PERICOLO
DI SIFONAMENTO

1

Osservazione diretta e localizzazione dei **FONTANAZZI** e di **ZONE “SURTUMOSE”** in cui nel terreno le pressioni neutre e quelle efficaci sono in equilibrio.

2

Monitoraggio, mediante l'utilizzo di **PIEZOMETRI**, del tipo Casagrande o dei tipi elettropneumatici od elettrici, delle pressioni neutre nel corpo arginale e nel terreno di fondazione.

- VERIFICA DELL'EFFICACIA DEGLI INTERVENTI (prima e dopo la costruzione);
- INDIVIDUAZIONE DI EVENTUALI ANOMALIE COSTRUTTIVE;
- COLLAUDO DELLE OPERE REALIZZATE.

ES: Il fatto che dopo la costruzione di un diaframma, sul lato campagna, le quote piezometriche nello strato permeabile di fondazione dell'argine risultino indipendenti dal livello dell'acqua nel fiume, conferma l'efficacia del diaframma nei confronti del pericolo di sifonamento.

I RILEVATI ARGINALI – PRINCIPALI CAUSE DI DISSESTO E ROTTURA

Durante la costruzione di nuovi rilevati o il rinforzo di quelli esistenti, nei tratti del medio e basso corso dei fiumi, in presenza dei terreni di fondazione di modesta resistenza meccanica e compressibili, per opere di particolare importanza e sviluppo, viene usualmente predisposto **il monitoraggio per il controllo della stabilità del corpo arginale e dell'andamento dei cedimenti del terreno di fondazione.**

I RILEVATI ARGINALI – CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA



AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO
PARMA

Specifica per le indagini e le prove geotecniche per la caratterizzazione degli argini

1

Costruzione di un 1° quadro di conoscenze.

Attività preliminare di raccolta e organizzazione delle informazioni disponibili

1. Indagini geotecniche disponibili (presso il Magistrato per il Po).
2. Informazioni registrate, nel corso di eventi di piena osservati, sui fenomeni ricorrenti di instabilità del corpo arginale da confrontare con lo stato attuale delle arginature, quale risulta dal catasto delle opere idrauliche, al fine di valutare il possibile permanere di tali fenomeni nelle attuali condizioni.
3. Raccolta, per i tratti adiacenti ai centri abitati, delle informazioni derivanti dai dati dalle indagini geotecniche effettuate dagli enti locali (soprattutto i comuni) a scopo diverso.

I RILEVATI ARGINALI – CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA



AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO
PARMA

Specifica per le indagini e le prove geotecniche per la caratterizzazione degli argini

2

**PROGRAMMA DI
INDAGINI GEOTECNICHE**

Prima caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione (profilo stratigrafico).

✓ I tratti arginali prioritari su cui programmare ed eseguire le indagini sono quelli a diretta difesa di centri abitati in corrispondenza dei quali si è riscontrata la ricorrenza di fenomeni di instabilità del corpo arginale.

✓ I criteri di impostazione delle indagini devono essere orientati all'impiego di prove speditive, espletabili nell'ambito del ridotto quadro temporale disponibile, atte a caratterizzare a livello preliminare ed in modo il più possibile omogeneo tutti i tratti del sistema arginale in studio che risultano, sulla base delle conoscenze empiriche disponibili, in condizioni di sicurezza critiche.

I RILEVATI ARGINALI – CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA



AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO
PARMA

Specifica per le indagini e le prove geotecniche per la caratterizzazione degli argini

2

PROGRAMMA DI
INDAGINI GEOTECNICHE

Prima caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione (profilo stratigrafico).

Allo scopo di ottenere una prima caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione dei rilevati arginali devono essere eseguite le **prospezioni geofisiche**.



Sulla base degli esiti di tali prospezioni geofisiche si individuano i **tratti a maggior criticità** sui quali eseguire le **indagini dirette**.

I RILEVATI ARGINALI – CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA



AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO
PARMA

Specifica per le indagini e le prove geotecniche per la caratterizzazione degli argini

2

PROGRAMMA DI
INDAGINI GEOTECNICHE

Prima caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione (profilo stratigrafico).

Occorre prevedere una campagna di indagine costituita da:

- indagini geofisiche eseguite con metodi sismici (sismica a rifrazione per onde P e per onde SH, metodo SASW basato sulla propagazione delle onde superficiali) o con metodi elettrici (tomografia elettrica);
- “set” di prove su singoli siti, costituiti da sondaggi diretti e da profili penetrometrici, eseguiti con il piezocono, adeguati alla caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione di una sezione di indagine.

I RILEVATI ARGINALI – CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA



AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO
PARMA

Specifica per le indagini e le prove geotecniche per la caratterizzazione degli argini

2

PROGRAMMA DI
INDAGINI GEOTECNICHE

Prima caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione (profilo stratigrafico).

In via orientativa, il set di prove su singoli siti può essere costituito dalle seguenti indagini e prove:

- n. 1 sondaggio a rotazione e carotaggio continuo spinto a profondità adeguata rispetto alle caratteristiche del corpo arginale (ordine di grandezza 20 m), con prelievo di 3 campioni per foro;
- n. 2 prove penetrometriche statiche con piezocono a profondità adeguata rispetto alle caratteristiche del corpo arginale (ordine di grandezza 20 m);
- prove di laboratorio sui campioni prelevati dai sondaggi (granulometria, limiti di Atterberg, peso specifico della parte solida, permeabilità).

I RILEVATI ARGINALI – CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

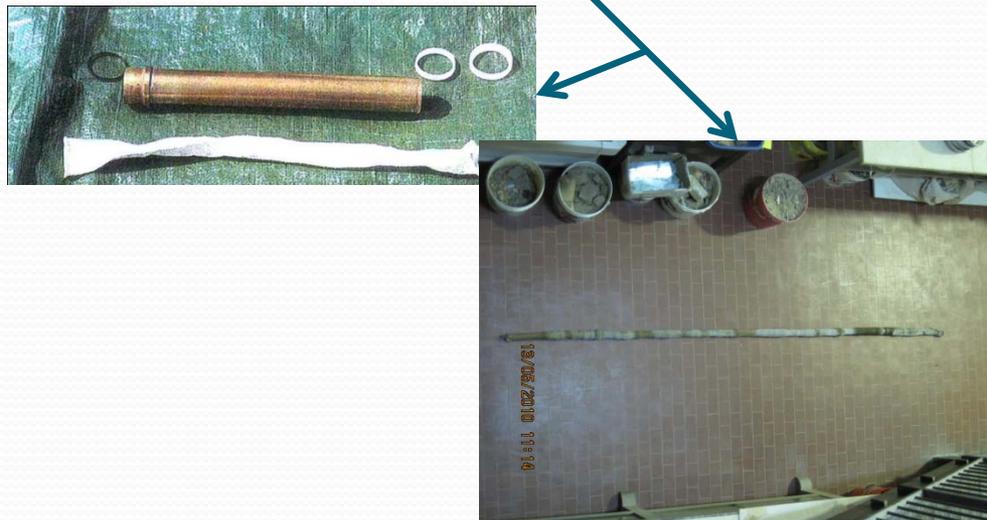
CAMPAGNA DI PROVE ARGINI FIUME SERCHIO

INDAGINI IN SITO

- ✓ Prove penetrometriche
- ✓ Sondaggi
- ✓ Campionamenti con carotiere autoingainante

INDAGINI DI LABORATORIO

- ✓ Calcolo della percentuale d' acqua
- ✓ Calcolo della densità secca
- ✓ Granulometrie
- ✓ Prove Proctor (addensamento)
- ✓ Prove triassiali
- ✓ Limiti di Atterberg



I RILEVATI ARGINALI – Sistema di monitoraggio proposto

MONITORAGGIO DEGLI ARGINI DEL SERCHIO

1

SCOPI DI PROTEZIONE CIVILE

Possibilità di disporre di un sistema di allerta rispetto a possibili fenomeni di rottura.

2

STRUMENTO DI VERIFICA DEI
POSSIBILI INTERVENTI DI
ADEGUAMENTO DEI RILEVATI
ARGINALI

Definire le zone che presentano maggiore criticità e verificare la correttezza delle analisi svolte.

I RILEVATI ARGINALI – Sistema di monitoraggio proposto

SISTEMA DI MONITORAGGIO

Obiettivo:

INDIVIDUAZIONE DELLA LINEA DI SATURAZIONE ALL'INTERNO DEL CORPO ARGINALE

Il corpo arginale rimane **asciutto** o in condizioni di **parziale saturazione** per periodi molto lunghi.

La misura diretta dei livelli piezometrici in appositi **piezometri mediante trasduttori di pressione** non è facilmente realizzabile perché il corretto funzionamento di questi ultimi richiede che essi siano **continuamente sommersi**.

Alternativa proposta:

MISURA INDIRETTA DEL GRADO DI UMIDITÀ ATTRAVERSO SONDE RESISTIVE

I RILEVATI ARGINALI – Sistema di monitoraggio proposto

SISTEMA DI MONITORAGGIO PROTOTIPO



Il sistema di monitoraggio si avvale di sonde per misurare l'umidità del terreno EC – 5 Decagon.



Esse determinano il contenuto volumetrico d'acqua misurando la costante dielettrica.



I RILEVATI ARGINALI – Sistema di monitoraggio proposto

SISTEMA DI MONITORAGGIO PROTOTIPO

La **resistività elettrica**, anche detta **resistenza elettrica specifica**, è l'attitudine di un materiale a opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche. Essa si misura in ohm per metro ($\Omega \cdot m$).

La resistività di un terreno è un parametro caratteristico (l'inverso della conducibilità) che dipende dal tipo di terreno stesso:

- dalla petrografia delle particelle che costituiscono il terreno;
- dal coefficiente di saturazione ;
- dalla cementazione delle particelle;
- dalla porosità .

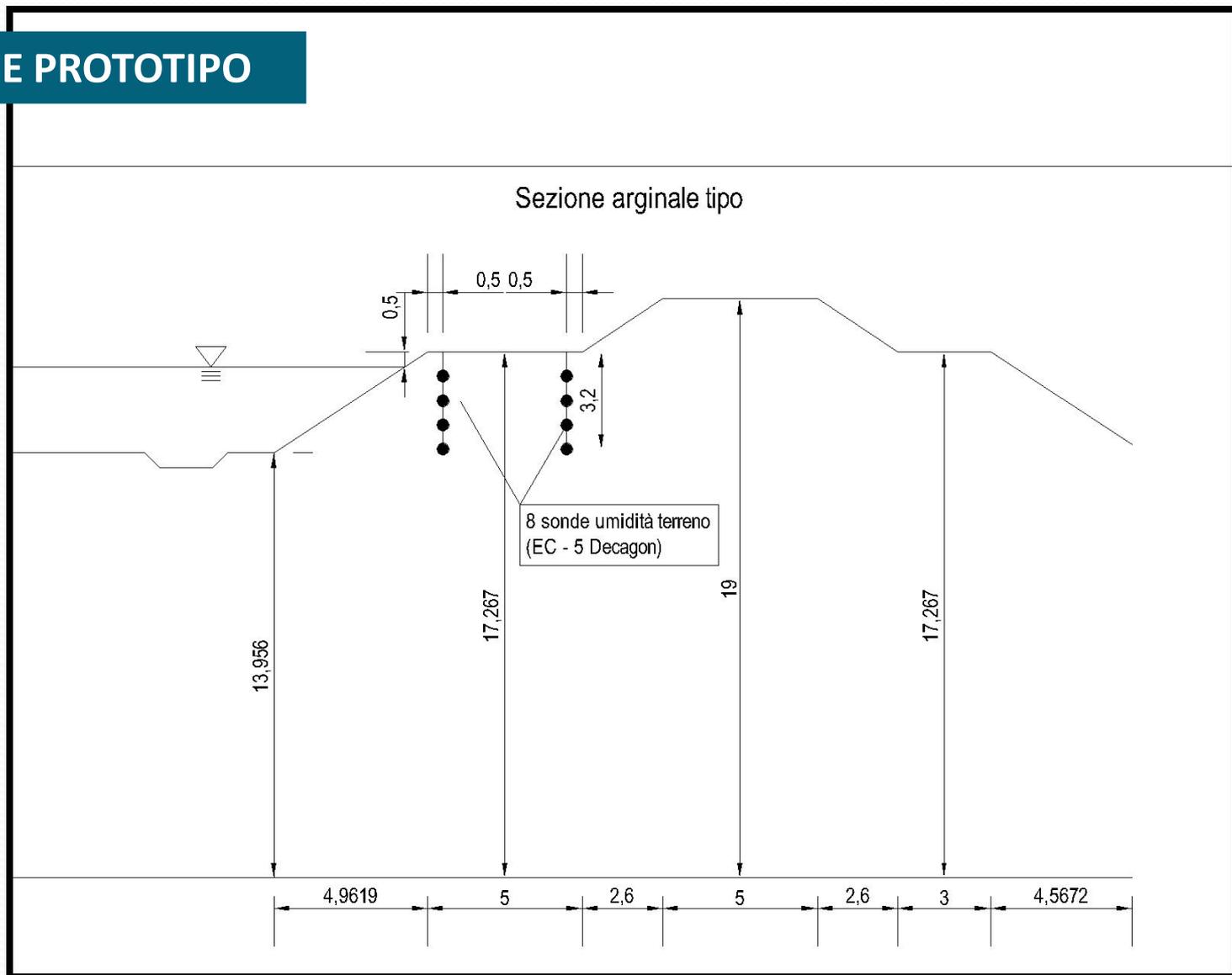
È comunque il contenuto in acqua che la fa da padrone nella determinazione del valore di resistività.

Le argille sono poco resistive, le ghiaie lo sono molto di più, specie se asciutte. Le arenarie sono solitamente meno resistive dei graniti.

Tipo di suolo	Resistività (min-max) ($\Omega \cdot m$)
Ceneri, brina, rifiuti	$6 \cdot 10^4 - 7 \cdot 10^5$
Argilla, terriccio, scisti	$3 \cdot 10^4 - 1.6 \cdot 10^6$
Argilla con variabile contenuto di sabbia e ghiaia	$1 \cdot 10^5 - 1.3 \cdot 10^7$
Ghiaia, sabbia e pietre	$6 \cdot 10^6 - 4.6 \cdot 10^7$

I RILEVATI ARGINALI – Sistema di monitoraggio proposto

SEZIONE PROTOTIPO



I RILEVATI ARGINALI – Sistema di monitoraggio proposto

SEZIONE PROTOTIPO

Le sonde saranno installate all'interno di fori realizzati nel corpo arginale mediante punta CPT o DPSH (penetrometro dinamico superpesante).

Calata la sonda a fondo foro, questo sarà riempito con terreno e vi verrà immessa acqua per facilitare il contatto sonda - terreno circostante e favorire la chiusura del foro. (Se possibile lo stesso foro viene utilizzato per la messa in opera di più sonde, altrimenti saranno realizzati fori adiacenti con differenti profondità).

In corrispondenza delle due verticali attrezzate con sonde resistive, saranno eseguiti due sondaggi a rotazione a carotaggio continuo sino alla profondità di 15 m con l'installazione di due piezometri Casagrande alla profondità di 5 m da piano campagna.

I sondaggi sono finalizzati all'installazione dei piezometri, alla determinazione diretta della stratigrafia ed al recupero del terreno necessario alla taratura delle sonde.

TARATURA DELLE SONDE



**CORRELAZIONE EMPIRICA TRA
RESISTIVITÀ E UMIDITÀ PER UN DATO
TERRENO**

I RILEVATI ARGINALI – Sistema di monitoraggio proposto

ESECUZIONE DEI SONDAGGI



TARATURA DEI SENSORI



MESSA IN OPERA DEI SENSORI



MESSA IN OPERA DEI PIEZOMETRI CASAGRANDE CON ACQUISIZIONE IN CONTINUO



INNALZAMENTO DEL LIVELLO IDRICO SINO ALLA SOMMITÀ DELLA BANCA



MISURE DI RESISTIVITÀ E PIEZOMETRICHE DURANTE IL PERIODO DI “PIENA”

LA STABILITÀ DEL RILEVATO (Slope Stability)



I RILEVATI ARGINALI – Stabilità

I metodi dell'equilibrio limite.

(Sviluppati a partire dagli inizi del 1900)



Utilizzati per lo studio delle frane di scivolamento.



Fenomeni di rottura in cui una porzione di pendio, sotto l'azione essenzialmente del peso proprio, scivola verso valle lungo una ben definita superficie di scivolamento.



Fenomeni molto studiati per la grande incidenza che hanno nei fenomeni di rottura che interessano le aree urbanizzate, i fronti di scavo, i rilevati stradali e ferroviari, le sponde dei canali e dei serbatoi, le dighe in terra.



Attualmente l'analisi della stabilità dei pendii è prevalentemente eseguita con essi.

ANALISI DELLA STABILITÀ DEI PENDII



Occorre avere consapevolezza di:

- Natura del problema geotecnico.
- Fattori determinanti l'instabilità e possibili meccanismi con cui essa si manifesta.
- Forze in gioco.
- Proprietà fisiche e meccaniche dei terreni.

I RILEVATI ARGINALI – Stabilità

Analisi della stabilità dei pendii
mediante i metodi dell'equilibrio limite.



Occorre conoscere le POTENZIALITA' e i LIMITI dei metodi di analisi utilizzati.

In relazione a:



- Ipotesi su cui si basano \Rightarrow Modello di terreno considerato;
- Possibilità di ricondurre il comportamento reale dei terreni coinvolti nell'ambito di tali ipotesi;
- Errori e approssimazioni che ne derivano.

**Analisi della stabilità dei pendii
mediante i metodi dell'equilibrio limite.**



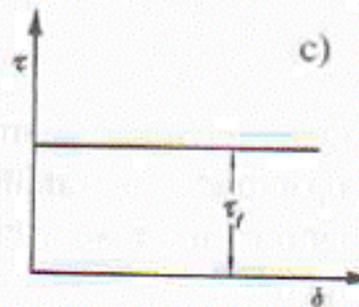
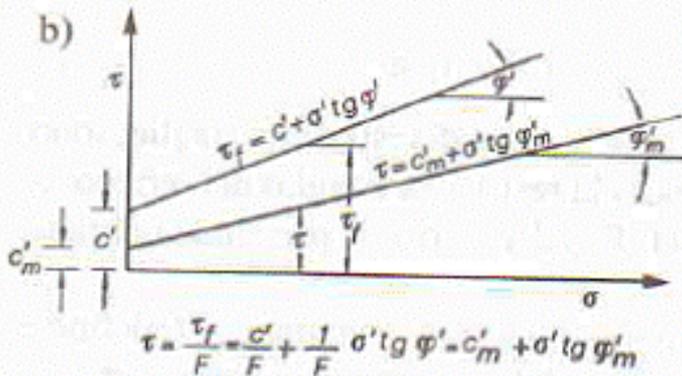
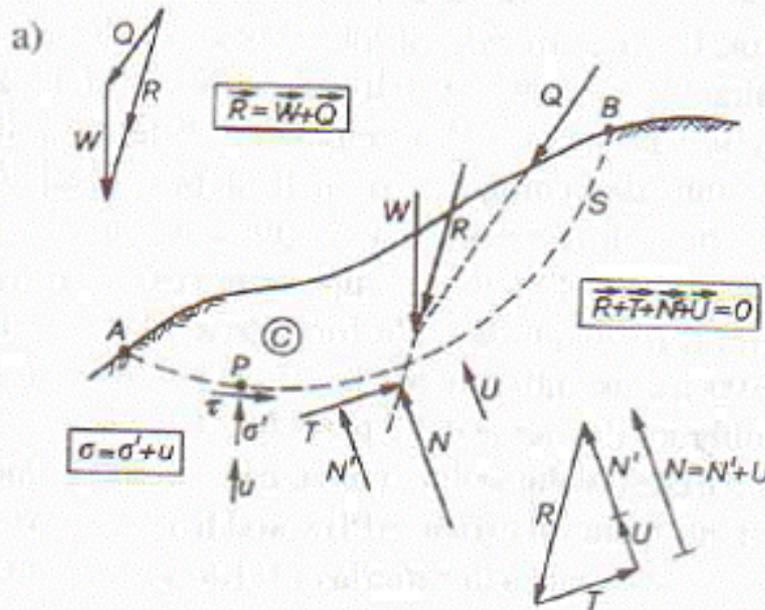
Occorre conoscere il programma di calcolo utilizzato



- 1. Intendere correttamente le procedure di ingresso dei dati;**
- 2. Essere in grado di analizzare i risultati dei calcoli e saggiarne la ragionevolezza.**

I RILEVATI ARGINALI – Stabilità

ANALISI DELLA STABILITÀ MEDIANTE I METODI DELL'EQUILIBRIO LIMITE



All'interno del pendio AB, ipotizzato molto esteso in direzione trasversale (\Rightarrow stato di deformazione piana), si isola il volume C mediante la superficie cilindrica di direttrice S.

Nel generico punto P di essa si hanno:

σ' = pressione efficace normale

τ = sforzo di taglio

u = pressione interstiziale.

Le corrispondenti forze risultanti, con riferimento ad un elemento di terreno di spessore unitario in direzione ortogonale al piano della figura, sono N' , T , U .

I RILEVATI ARGINALI – Stabilità

ANALISI DELLA STABILITÀ MEDIANTE I METODI DELL'EQUILIBRIO LIMITE

Il volume C è in equilibrio sotto l'azione delle forze di volume e di superficie agenti sul contorno:

$$\mathbf{R} = \mathbf{W} + \mathbf{Q} = \mathbf{N}' + \mathbf{T} + \mathbf{U}$$

Con:

W = forza peso

Q = carichi esterni concentrati o distribuiti sul piano campagna

C è in equilibrio limite quando in tutti i punti della superficie APB è soddisfatta la condizione di rottura, nell'ipotesi di validità del criterio di rottura di Mohr – Coulomb:

$$\tau = \tau_f = c' + (\sigma - u) \cdot \operatorname{tg} \varphi'$$

I RILEVATI ARGINALI – Stabilità

ANALISI DELLA STABILITÀ MEDIANTE I METODI DELL'EQUILIBRIO LIMITE

Se lungo S:



tensione tangenziale applicata
= **resistenza mobilitata**

resistenza a rottura
= **resistenza disponibile**

È possibile determinare per C una condizione limite riducendo opportunamente la resistenza disponibile in modo che risulti:

$$\tau = \frac{\tau_f}{F} = \frac{c'}{F} + \frac{1}{F} \cdot \sigma' \cdot \operatorname{tg} \varphi'$$

F = coefficiente di sicurezza =

$$F = \frac{T_f}{T} = \frac{\text{capacità}}{\text{domanda}}$$

fattore per cui occorre dividere i parametri della resistenza a taglio del terreno per provocare la rottura del pendio lungo la superficie considerata \Rightarrow caratterizza la sicurezza del pendio nei riguardi della rottura per taglio lungo la superficie S.

F in realtà è variabile lungo S ma si assume costante \Rightarrow F = rapporto tra la resistenza media disponibile e quella media mobilitata, ovvero tra la resistenza a taglio complessivamente disponibile (T_f) e quella complessivamente mobilitata (T).⁸⁷

I RILEVATI ARGINALI – Stabilità

ANALISI DELLA STABILITÀ MEDIANTE I METODI DELL'EQUILIBRIO LIMITE

Modalità con cui si
perviene al collasso



Si ipotizza che il terreno abbia legame costitutivo di tipo
rigido perfettamente plastico



Non si deforma finché non raggiunge la condizione di
rottura, oltre la quale la resistenza si mantiene costante
indipendentemente dall'intensità degli spostamenti
accumulati.

In questo modo il masso C può essere assimilato ad un **blocco rigido** in condizione di
incipiente scivolamento lungo la S ed il calcolo del coefficiente F può essere sviluppato
utilizzando le **equazioni dell'equilibrio dei corpi rigidi**.

$$\sum V_i = 0$$

$$\sum H_i = 0$$

$$\sum M_i = 0$$

I RILEVATI ARGINALI – Stabilità

ANALISI DELLA STABILITÀ MEDIANTE I METODI DELL'EQUILIBRIO LIMITE

A ciascuna delle infinite superfici S ipotizzabili, si può associare un valore di F .

La superficie cui compete il valore minimo di F si definisce **superficie critica**.

Il valore minimo si definisce **coefficiente di sicurezza del pendio** ed è assunto per caratterizzarne le condizioni di stabilità.

L'analisi di stabilità può riguardare:

1 Rotture già avvenute (*back analysis*).

In questo caso la superficie di scivolamento è nota (da opportune indagini) ed F al momento del collasso è assunto uguale a 1.

L'obiettivo dell'analisi è ricavare informazioni, sulle cause che hanno potuto determinare la rottura del pendio, e sui valori dei parametri della resistenza al taglio operativi al momento del collasso, i quali sono utilizzati per la scelta e il dimensionamento delle opere di stabilizzazione.

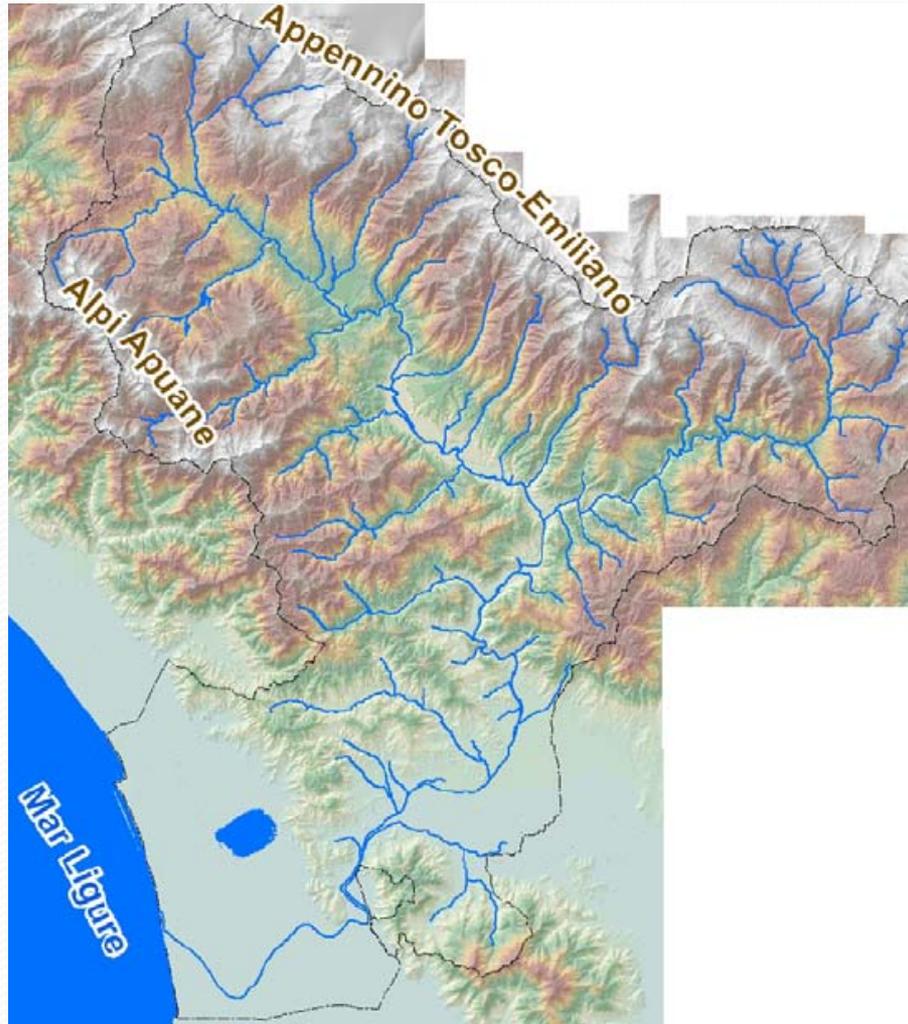
2 Pendii non ancora interessati da un fenomeno di rottura.

In questo caso la forma e l'ubicazione della superficie di scivolamento critiche ed F sono incogniti e devono essere determinati come soluzione del problema, in genere per tentativi.

I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

BACINO DEL SERCHIO

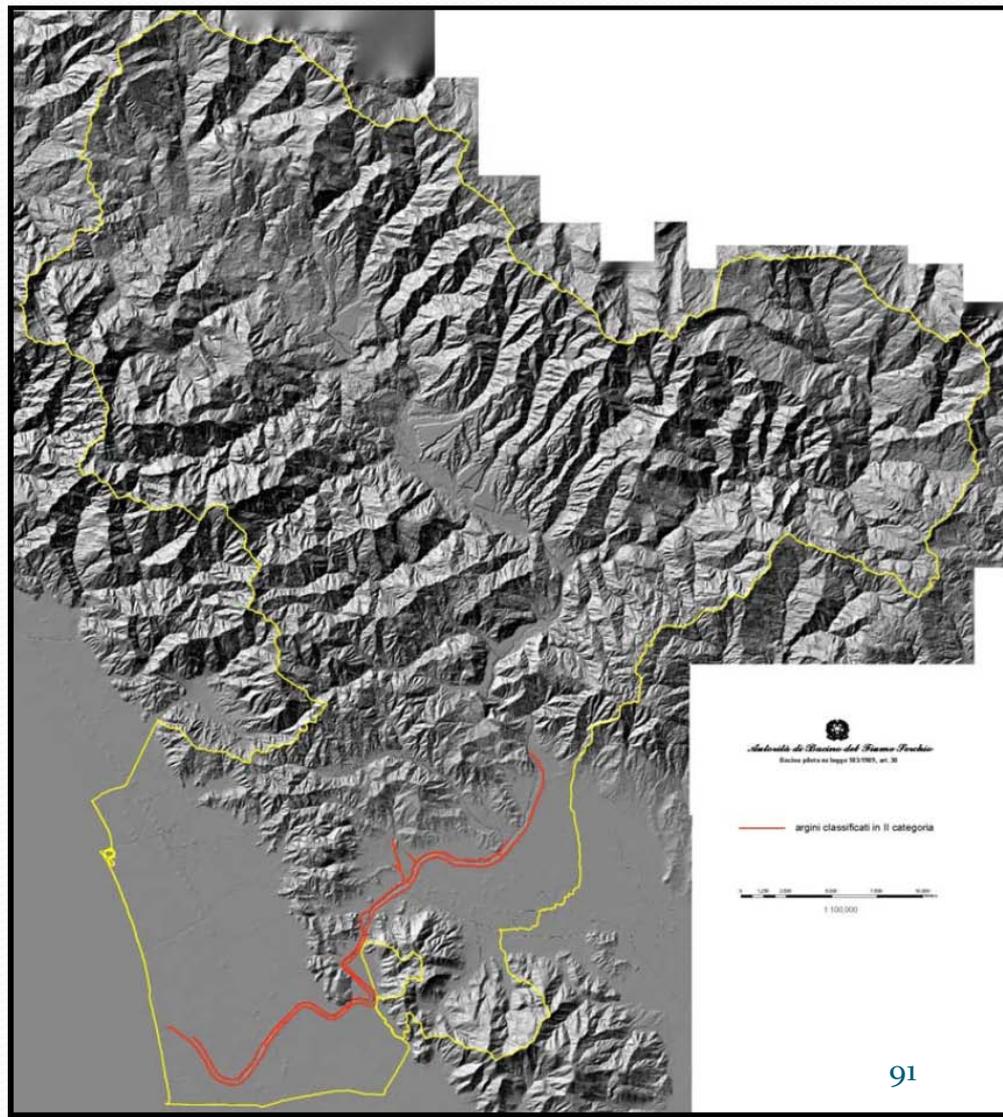
La posizione geografica del bacino, la presenza e l'orientamento di due allineamenti di rilievi (Alpi Apuane e catena appenninica) paralleli alla linea di costa, direttamente esposti al passaggio delle perturbazioni di origine atlantica, generano le condizioni per sollecitazioni pluviometriche particolarmente intense: in alcune stazioni dell'alto corso del Serchio si registrano valori cumulati medi annui di pioggia tra i più alti in assoluto in Italia.



I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

BACINO DEL SERCHIO

Il tratto del fiume arginato con opere classificate in II categoria idraulica, disciplinate dal Regio Decreto 25.07.1904 n° 523, ha inizio in riva sinistra in corrispondenza del ponte di Sant'Ansano a Ponte a Moriano (7 km a nord di Lucca, bacino sotteso 1190 kmq) e in riva destra all'altezza della città di Lucca presso la località Montebonelli (bacino sotteso 1210 kmq).



I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

Lo sviluppo totale del tratto arginato compreso tra Ponte a Moriano e la foce è di circa 39 km, suddivisibili in tratti omogenei.

Tratto	Lunghezza tratto [km]	Pendenza media [-]
Ponte a Moriano - Lucca Monte San Quirico	6,1	0,0025
Monte San Quirico- Ponte San Pietro	5,5	0,0020
Ponte San Pietro-Ripafratta	5,3	0,0010
Ripafratta-Pontasserchio	6,8	0,0008
Pontasserchio- Migliarino	5,8	0,0002
Migliarino-foce	9,0	0,0001

[Fonte: Autorità di Bacino del fiume Serchio.]

Le sezioni del corso d'acqua sono caratterizzate da golene di ampiezza variabile tra pochi metri (in corrispondenza di tratti protetti da muri di sponda) e 250 metri (nel tratto in sinistra idraulica a monte di Lucca) e sono quasi sempre difese da opere longitudinali o trasversali repellenti (argini golenali, pennelli).

I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

Le prime opere di canalizzazione e arginatura sul Serchio risalgono all'epoca romana. Dopo la caduta dell'impero, gran parte delle opere furono abbandonate e il corso d'acqua riprese a scorrere in modo disordinato nella pianura lucchese.

Nel periodo compreso tra il 1000 e il 1800 il governo lucchese realizzò interventi di difesa dalle inondazioni della città.

Nel 1761 fu dato incarico all'ing. Arnolfini di affrontare in modo definitivo la regimazione del Serchio. Furono consolidate le sponde e gli argini in tutto il tratto da Ponte a Moriano a Ponte S. Quirico. Fu rettificata la parte finale del Serchio da Vecchiano a Migliarino.

Dopo la morte di Arnolfini, nel 1818 l'arch. Nottolini proseguì l'opera di arginatura completandola da Ponte a Moriano fino a Ripafratta e realizzando argini trasversi (ancora oggi visibili) nelle aree golenali a difesa delle strutture principali di contenimento.

I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

L'impianto generale della sistemazione idraulica del Serchio è stato sottoposto a progressivi consolidamenti ed adeguamenti geometrici e strutturali in conseguenza degli eventi di piena succedutisi nel tempo senza tuttavia che lo schema complessivo subisse, in epoche più recenti, modifiche sostanziali.

ARGINI MAESTRI ATTUALI

Altezze massime sul p.c. pari a circa 6 m.

Pendenza dei paramenti accentuata: mediamente 1/1.5 ma localmente anche superiore.

I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

CRITICITÀ

```
graph TD; A[CRITICITÀ] --> B[Numerose preesistenze nelle golene:]; A --> C[Presenza, nel tratto arginato, di alcuni nodi infrastrutturali];
```

Numerose preesistenze nelle golene:

- insediamenti storici di tipo agricolo e/o residenziale;
- siti di lavorazione e stoccaggio di materiali inerti;
- infrastrutture a servizio di zone ricreative.

Presenza, nel tratto arginato, di alcuni nodi infrastrutturali (in corrisp. di attraversamenti ferroviari o della viabilità principale).

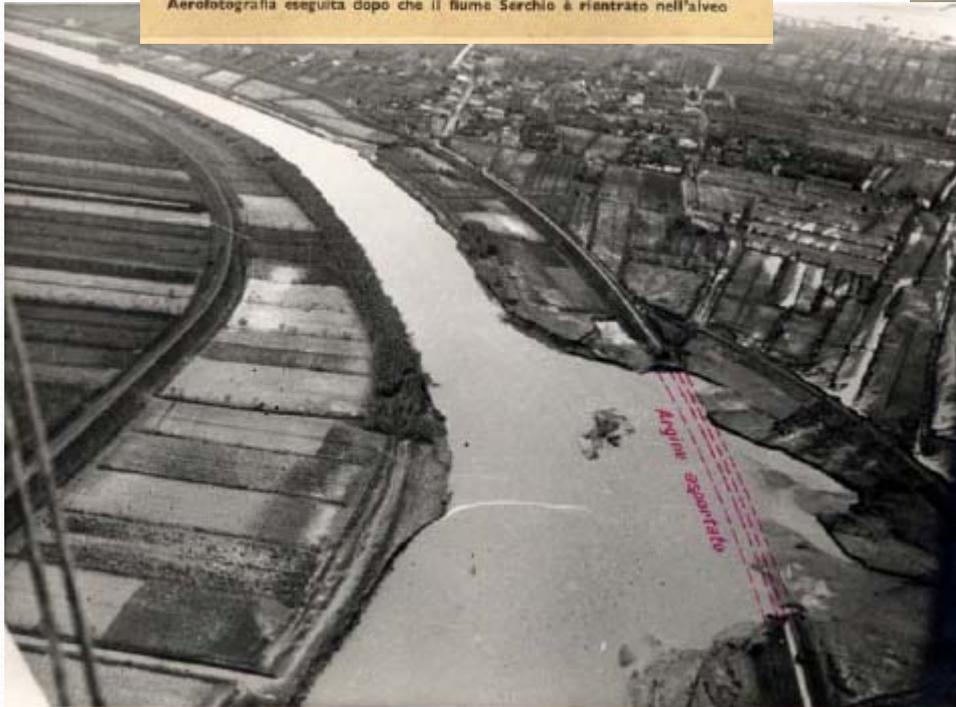
I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

EVENTI PIÙ SIGNIFICATIVI DEL PERIODO PIÙ RECENTE

Evento di piena del 17 novembre 1940

ROTTA DEL FIUME SERCHIO A NODICA

Aerofotografia eseguita dopo che il fiume Serchio è rientrato nell'alveo



UNO DEI QUATTRO IMPIANTI IDROVORI DELLA BONIFICA SOMMERSO



[Fonte: *Consorzio di Bonifica Versilia Massaciuccoli*].

I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

EVENTI PIÙ SIGNIFICATIVI DEL PERIODO PIÙ RECENTE

Evento di piena del 9 - 12 novembre 1982



1. Ponte della Maddalena, loc. Borgo a Mozzano (Allagamento SS12 del Brennero); 2. Passerella pedonale, loc. Turrite Cava; 3. Ponte di S. Ansano, Ponte a Moriano.



I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

EVENTI PIÙ SIGNIFICATIVI DEL PERIODO PIÙ RECENTE

Evento di piena del 9 giugno 1992



Esondazione del Torrente Freddana.

I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

EVENTI PIÙ SIGNIFICATIVI DEL PERIODO PIÙ RECENTE

Evento di piena del 6 – 7 novembre 2000



1. Rottura dell'argine in località "Cateratte" di Nozzano; 2. Allagamento in località Nozzano; 3. Rottura arginale canale Ozzeri, loc. Patrignone, Rigoli.

I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

EVENTI PIÙ SIGNIFICATIVI DEL PERIODO PIÙ RECENTE

Evento di piena del 25 dicembre 2009

Breccia arginale a monte della bretella autostradale Lucca – Viareggio.

Breccia di circa 30 m di lunghezza. Scucchiamento del paramento arginale lato fiume; assenza di fenomeni significativi di incisione della golenale.

Lato campagna, essendo il fiume pensile in quel tratto, si è verificata l'erosione del rilevato arginale sino alle quote del piano campagna ed oltre.



I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

EVENTI PIÙ SIGNIFICATIVI DEL PERIODO PIÙ RECENTE

Evento di piena del 25 dicembre 2009

Breccia arginale a valle della bretella autostradale Lucca – Viareggio.



Le superfici esposte si presentavano nette, verticali ed approssimativamente perpendicolari all'asse dell'argine. A seguito del deflusso dalla breccia, in golenia si è formata un'incisione di circa un metro di profondità; lato campagna (anche in questo tratto il fiume è pensile), si sono verificati gli stessi fenomeni erosivi già visti per la breccia di monte.

I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

EVENTI PIÙ SIGNIFICATIVI DEL PERIODO PIÙ RECENTE

Evento di piena del 25 dicembre 2009



L'intervento di urgenza di ripristino arginale è consistito in:

- Posa in opera di uno strato di base in massi ciclopici intasati con misto di cava;
- Posa in opera di un nucleo centrale a sezione trapezia in geoblocchi di calcestruzzo, intasati con calcestruzzo e strutturati con rete elettrosaldata;
- Ricoprimento in terra;
- Realizzazione di un taglione in CLS, al piede dell'argine lato fiume, di circa 4 m di profondità ed esteso nell'argine integro a monte ed a valle della breccia.

E' stata infine realizzato un ulteriore confinamento delle brecce con un diaframma in palancole metalliche infisse nel terreno per circa 7 metri.

I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

EVENTI PIÙ SIGNIFICATIVI DEL PERIODO PIÙ RECENTE

Evento di piena del 25 dicembre 2009



Rotta arginale in loc. Nodica durante la mattina del 25/12/2009 [Fonte: “La voce del Serchio”].



Il cedimento ha interessato l'argine destro in un tratto sito circa un km a monte del cavalcavia dell'autostrada A12 Genova – Rosignano, ed ha originato una falla di circa 160 m di lunghezza. Immediatamente prima del cedimento, a tergo del rilevato arginale c'è stato un fenomeno di piping dal corpo arginale al di sopra della banca sul lato campagna. Non ci sono stati sormonti arginali.

I RILEVATI ARGINALI – Il fiume Serchio

EVENTI PIÙ SIGNIFICATIVI DEL PERIODO PIÙ RECENTE

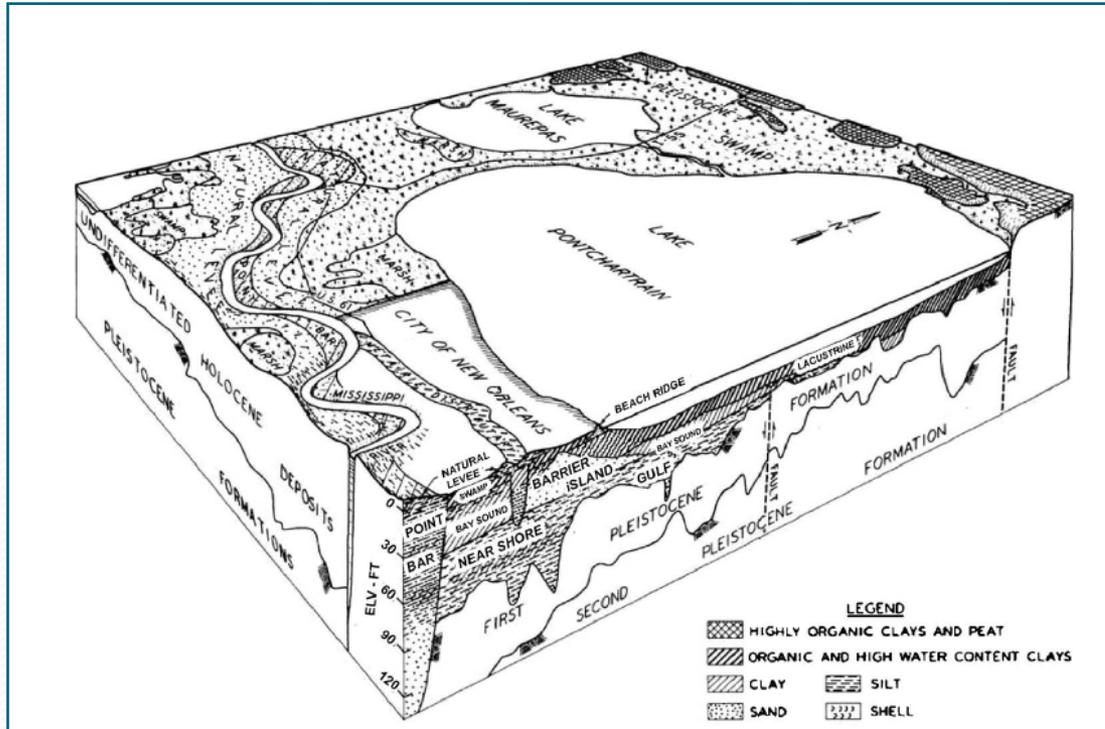
Evento di piena del 25 dicembre 2009



L'intervento di urgenza di ripristino arginale è stato condotto realizzando subito un contro - argine sul lato campagna, sino alla quota originaria della golena.

Successivamente una struttura analoga è stata realizzata lato fiume ed è stato riempito lo spazio tra le due opere, in modo da costituire la base per il completo ripristino della sezione arginale.

I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina



AREA ORIGINARIAMENTE PALUDOSA



BONIFICA



URBANIZZAZIONE

L'abbassamento del livello della falda a causa della costruzione di canali di drenaggio e del drenaggio superficiale ha causato una riduzione del volume del suolo, l'ossidazione dei sedimenti organici e un abbassamento del livello del suolo.



MOLTE AREE SI TROVANO AD UNA QUOTA INFERIORE A QUELLA DEL LIVELLO DEL MARE.

I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

Lo studio dei capisaldi di livellazione dell'area di New Orleans dell'IPET ha mostrato che la SUBSIDENZA (circa 5 mm/anno; Dixon et al. 2006, Burkett et al. 2003.) non ha contribuito direttamente a nessuna delle rotture degli argini ma è stata responsabile del fatto che il livello dei sistemi di protezione fosse più basso di 1-2 ft rispetto a quanto originariamente prescritto.

I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

DEPOSITIONAL TYPES	LITHOLOGY PERCENT					REMARKS
	0	25	50	75	100	
NATURAL LEEVES						Disposed in narrow bands flanking the Mississippi River and its abandoned courses and distributaries. Elevation varies from 25 feet near Baton Rouge to sea level.
POINT BAR						Usually found flanking the more prominent bends of present and abandoned courses. Thickness in excess of 100 feet.
PRODELTA CLAYS						Fat clay in offshore areas and at depth beneath deltaic plain. Thickness ranges between 50 and 400 feet.
INTRADelta						Coarse portion of subaqueous delta. Intricately interfingered deposits. Disposed in broad wedges about abandoned courses and major distributaries.
INTERDIS-TRIBUTARY						Forms clay wedges between major distributaries. Minor amounts of silts and fine sands typically occur in very thin but distinct layers between clay strata.
ABANDONED DIS-TRIBUTARY						Form belts of clayey sediments from a few feet to more than 1000 feet in width and from less than 10 to more than 50 feet in depth.
ABANDONED COURSE						Form belts of fairly coarse sediment in abandoned Mississippi River courses. Lower portion filled with sands, upper portion with silts and clays. Coarsest fill near point of diversion.
SWAMP						Tree-covered organic deposits flanking the inner borders of the marsh and subject to fresh-water inundation. Deposits 3 to 10 feet thick.
MARSH						Forms 90 percent of land surface in the deltaic plain. Ranges from watery organic oozes to fairly firm organic silts and clays. Average thickness 15 feet.
ABANDONED TIDAL CHANNELS						Found principally in peripheral marsh areas. Average depths on the order of 25 feet. Widths average 200 feet. Filling varies from peat to organic clay.
SAND BEACH						Border the open gulf except in areas of active deltaic advance. May be a mile or more wide and more than 10 miles long. Sand may pile as high as 30 feet and subside to depths 30 feet below gulf level.
SHELL BEACH						Border landward shores of protected bays and sounds and marshland lakes. Vary from 25 to 200 feet in width and from 2 to 6 feet in height. Lengths usually less than a mile.
LACUSTRINE						Deposits vary in thickness from 2 to 25 feet. Stratification in clayey lacustrine deposits is poorly developed or lacking.
REEF						Active reefs found principally in bay-sound areas. Buried reefs 5 to 10 feet thick a common occurrence within deltaic plain. Reach dimensions of 1/2-mile wide and 10-miles long.
BAY-SOUND						Relatively coarse sediments on bottoms of bays and sounds. Thickness between 3 and 20 feet.
NEARSHORE GULF						Found at the borders of the open ocean seaward of the barrier beaches. Thickness normally increases with distance from shore.
SUB-STRATUM						Massive sand and gravel deposits filling entrenched valley and grading laterally into nearshore gulf deposits. Material becomes coarser with depth.
PLEIS-TOCENE						Ancient former deltaic plain of Mississippi River. Consists of environments of deposition and associated lithology similar to those found in Recent deltaic plain. Depth of this ancient, eroded surface increases in a southerly and westerly direction in southeastern Louisiana.

LEGEND

	GRAVEL (>20 MM)		SAND (2.0-0.05 MM)		SILT (0.05-0.005 MM)
	CLAY (<0.005 MM)		ORGANIC MATERIAL		SHELL

DEPOSITIONAL TYPES	NATURAL WATER CONTENT PERCENT DRY WEIGHT	UNIT WEIGHT LB/CU FT	SHEAR STRENGTH (1)	
			COHESIVE STRENGTH LB/50 SQ FT	VALUES RANGE TO APPROXIMATELY 2500 CHARACTERISTIC RANGE 800-1200
NATURAL LEEVES				VALUES RANGE TO APPROXIMATELY 2500 CHARACTERISTIC RANGE 800-1200
POINT BAR				
PRODELTA CLAYS				
INTRADelta		INSUFFICIENT DATA		INSUFFICIENT DATA
INTERDIS-TRIBUTARY				
ABANDONED DIS-TRIBUTARY				
ABANDONED COURSE	INSUFFICIENT DATA	INSUFFICIENT DATA		INSUFFICIENT DATA
SWAMP				
MARSH	VALUES RANGE TO APPROXIMATELY 800			
ABANDONED TIDAL CHANNELS	INSUFFICIENT DATA	INSUFFICIENT DATA		VERY LOW
SAND BEACH	SATURATED	INSUFFICIENT DATA		0
SHELL BEACH	SATURATED	INSUFFICIENT DATA		0
LACUSTRINE				
REEF	SATURATED	INSUFFICIENT DATA		0
BAY-SOUND				
NEARSHORE GULF	SATURATED	INSUFFICIENT DATA		0
SUBSTRATUM	SATURATED	INSUFFICIENT DATA		0
PLEIS-TOCENE				VALUES RANGE TO APPROXIMATELY 3500 CHARACTERISTIC RANGE 900-1700

(1) SHEARING STRENGTH OF CLAYS BASED ON UNCONFINED COMPRESSION TESTS.

TYPICAL RANGE OF VALUES INDICATED BY LENGTH OF BAR. BAR WIDTH INDICATES RELATIVE DISTRIBUTION OF VALUES.

I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

I DIVERSI AMBIENTI DEPOSIZIONALI DEL DELTA

TESSITURE PREVALENTEMENTE SABBIOSE



Ambienti caratterizzati da elevata velocità delle correnti e moti ondosi
→ spiaggia, intradelta, ecc.

TESSITURE PREVALENTEMENTE ARGILLOSE



Ambienti del delta, caratterizzati da minori energie fluviali → ambiente lacustre, palude, prodelta, ecc.

Le proprietà meccaniche dei terreni del delta fluviale dipendono dalla loro origine, dall'età, dalla corrente locale, dall'evoluzione geomorfologica e dai cambiamenti provocati dall'uomo dopo la deposizione.

I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

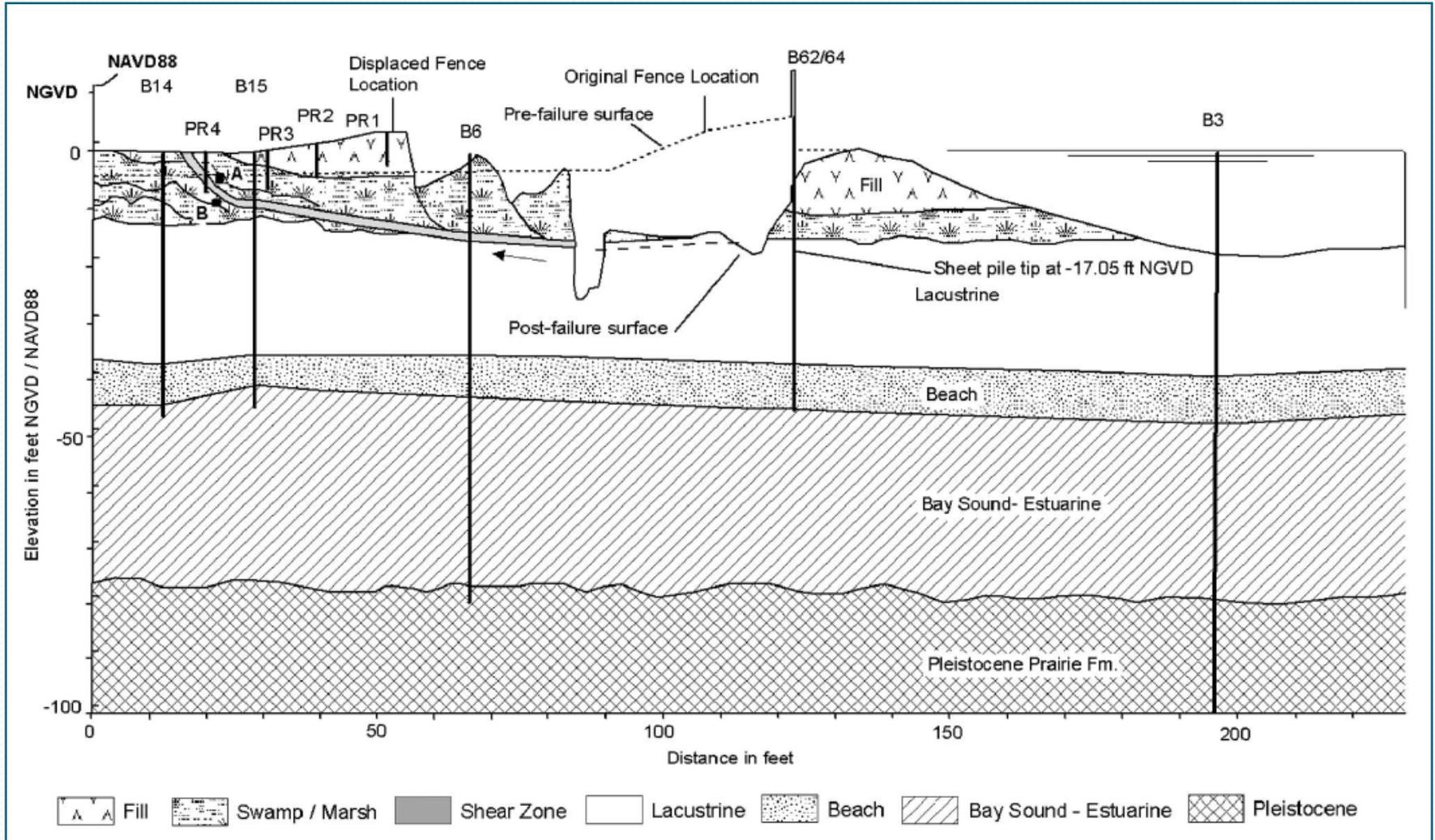
17th Street Canal

La rottura è avvenuta lato terra.
La stratigrafia dei terreni di fondazione
in corrispondenza del punto in cui si è
verificata la rottura è costituita da
stratificazioni orizzontali di argille fini.



I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

17th Street Canal



I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina



SLIDE SURFACE

17th Street Canal

Strato di spessore pari a 1 ft, di ARGILLA LACUSTRE soffice, grigia, molto plastica, “wet”, dalla consistenza simile a “soffice burro di arachidi”, disposta su depositi torbosi al piede del rilevato.

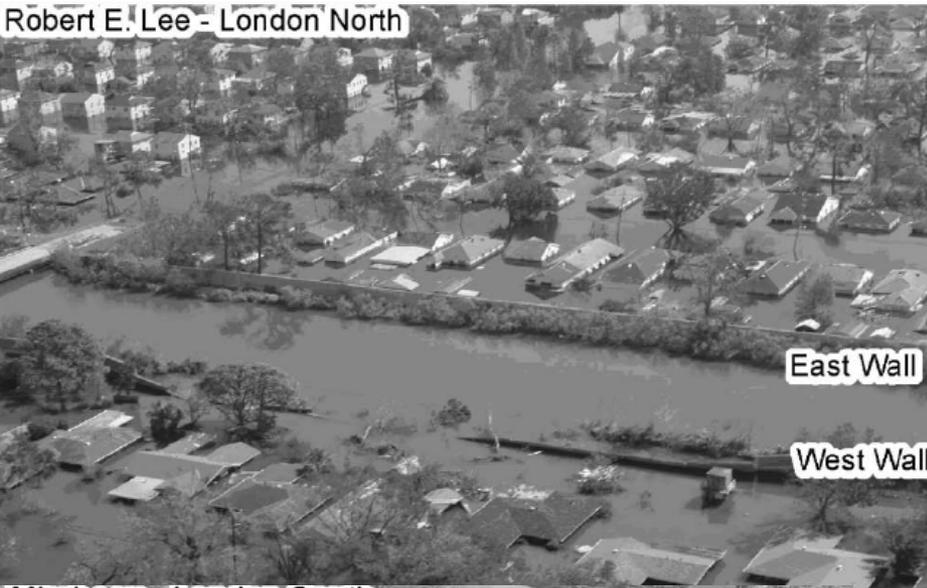
Inizialmente era stato ritenuto responsabile della rottura lo strato di torba a causa della sua scarsa resistenza al taglio, ma, sono stati rinvenuti blocchi appartenenti alla zona di rottura, in cui è chiaramente visibile l'argilla lacustre grigia inferiore ancora saldamente attaccata alla sovrastante torba di palude.

Il contatto intatto tra questi due ambienti deposizionali è distinto.



I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

Robert E. Lee - London North



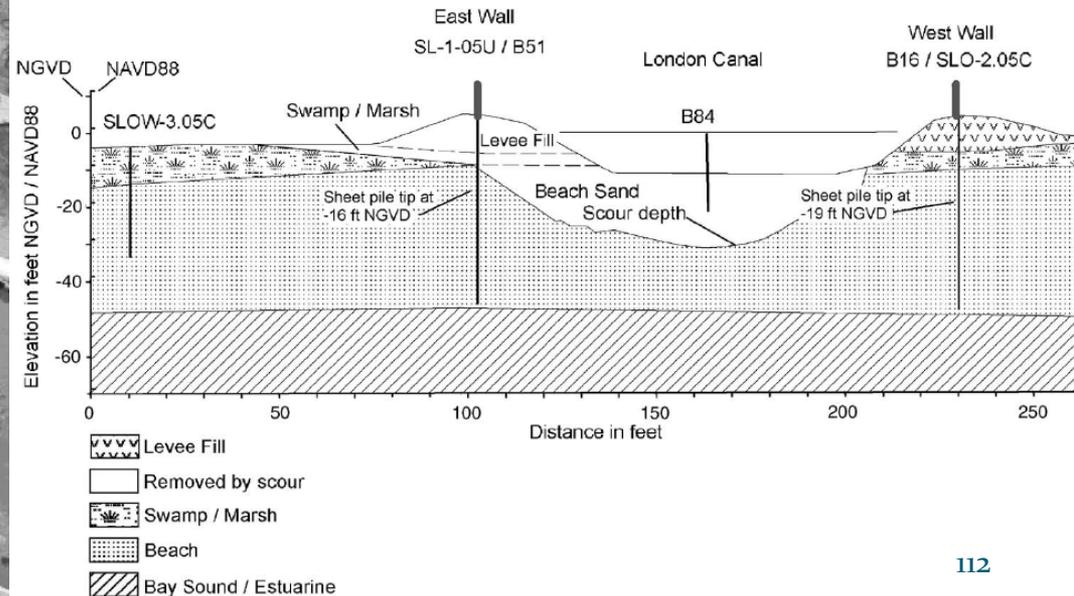
London Avenue Canal

GEOLOGIA E AMBIENTI DEPOSIZIONALI PRESENTI NEL SOTTOSUOLO.



- < 6 ft → strato paludoso;
- 40 ft → relict beach;
- 30 ft → depositi di estuario.

Mirabeau - London South



I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

London Avenue Canal

ROTTURE



EVIDENZE DI SEEPAGE E PIPING



1. Deflessione I-WALL lato terra prima della rottura;
2. Bolle di sabbia al piede del rilevato lato terra;
3. Vuoti circolari di piccolo diametro nel rilevato arginale.



I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

Si sono verificati diversi catastrofici danneggiamenti negli argini accompagnati da massive erosioni e larghe aperture ricavate nelle sezioni.



Fig. 16. Photo showing outboard side levee erosion, and crest “notching” and crenellation due to storm wave erosion and overtopping along the MRGO frontage levees at the northeast edge of the St. Bernard/Ninth Ward protected area (IPET 2006)

Le sezioni danneggiate hanno in comune tre caratteristiche:

1. Sono state costruite usando **materiale dragato dal fiume** o ricavato dall'**escavazione dei vicini canali** navigabili, posto in opera con un **contenuto elevato di acqua** e quindi **non adeguatamente compattato**.
2. Si trovano in una posizione **esposta al vento ed alle onde**;
3. **Mancanza di vegetazione matura** lato fiume che avrebbe potuto aiutare a dissipare l'energia e l'intensità delle onde che attaccavano e sormontavano l'argine.

I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

Argini costruiti con **argilla compattata** e con materiali posti in opera e compattati con **adeguato contenuto d'acqua**.

Performance molto buone (piccolissimi danneggiamenti ed erosioni).

Argini costruiti con argilla ma contenenti numerose **zone costituite da sabbia fine e sabbia argillosa e limosa**.

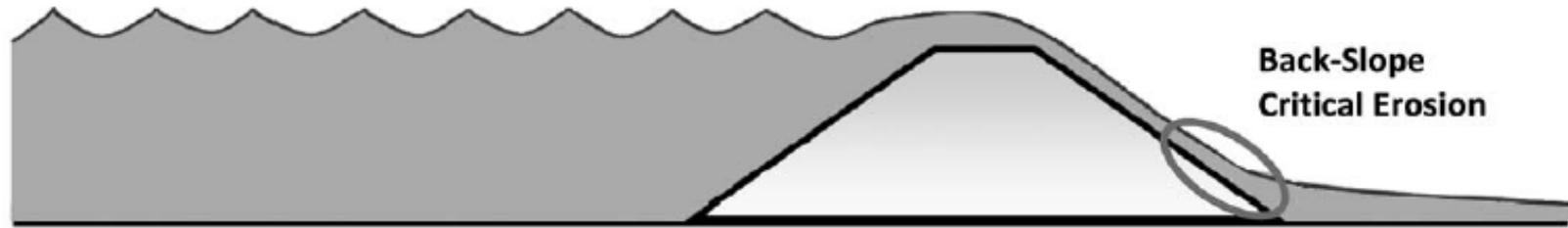
Mancanza di compattazione → bassa resistenza all'erosione.



Non potevano essere lavorati e compattati adeguatamente appena dragati così erano posti in opera in tre o quattro strati successivi. In ciascuna fase il terreno era posto in opera con una bassa pendenza (5:1 o meno) e gli si dava il tempo di assestarsi e consolidare. Quando il materiale si asciugava un po' gli argini venivano risagomati e si procedeva nello stesso modo aggiungendo un altro strato, dopo l'ultima sagomatura l'argine assumeva la tipica forma con pendenza dell'ordine di 3,5:1.

I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

MECCANISMI DI EROSIONE



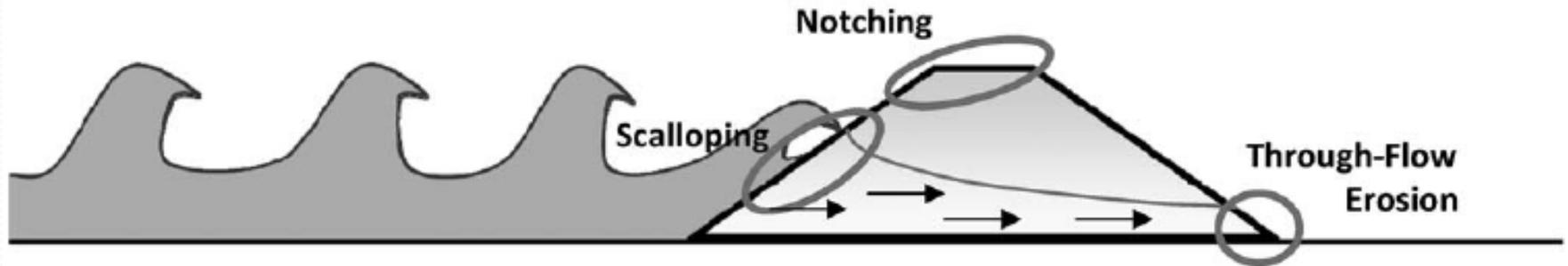
(a) Sheet flow overtopping erosion of the lower back slope face.

a) Classica erosione da sormonto.

Mentre l'acqua oltrepassa la sommità del rilevato arginale e discende lato terra, la velocità del flusso aumenta e, di conseguenza, aumenta anche la forza di taglio tra acqua e terreno del rilevato. In questo modo la forza erosiva di trazione esercitata dall'acqua aumenta sulla porzione alla base del pendio lato terra, la quale risulta la regione critica per quanto riguarda l'erosione da sormonto. Questo tipo di erosione può essere provocata sia dal sormonto sostenuto che da sormonto periodico provocato da onde.

I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

MECCANISMI DI EROSIONE



(b) Wave erosion of the front face, and through-flow erosion of the lower back face.

b1) Scalloping. Erosione provocata, lato fiume, dall'azione delle onde che si alzano a causa del vento;

b2) Notching. Se l'onda si alza può intaccare e frastagliare la cresta dell'argine producendo un fenomeno detto "crenelation" in analogia alla dentellatura presente sulla sommità delle mura dei castelli medievali;

b3) Through – Flow Erosion. Erosione causata da un flusso di filtrazione attraverso la sezione del rilevato arginale che fuoriesce alla base del pendio lato terra.

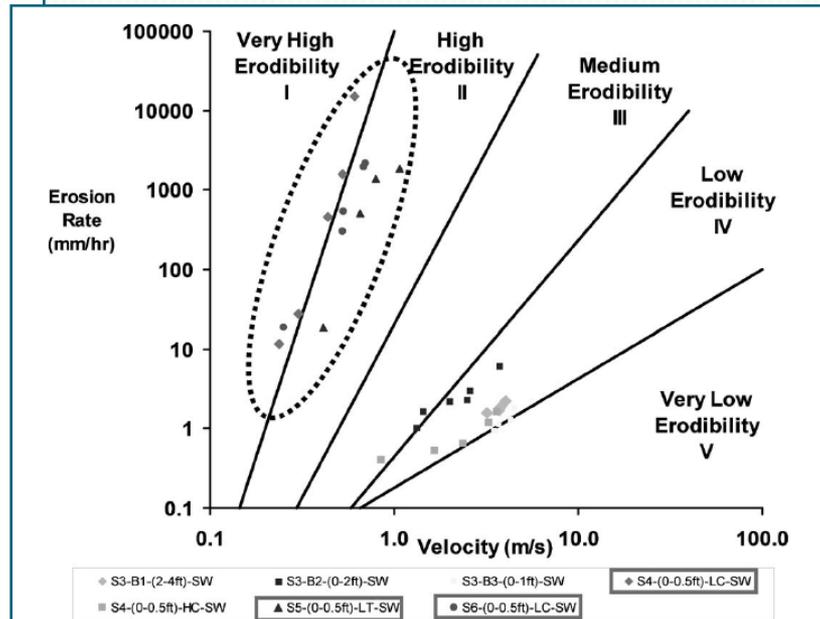
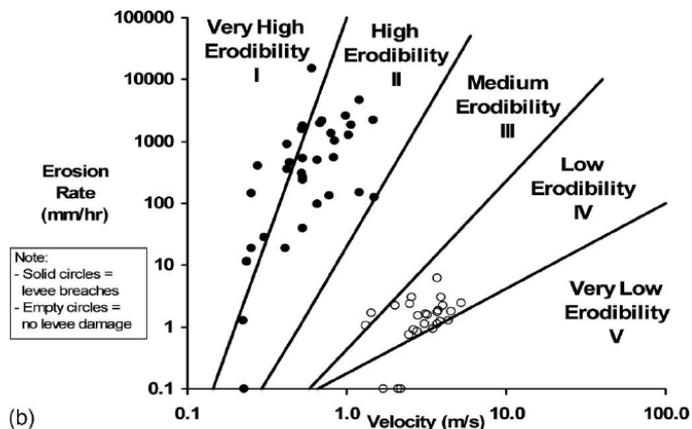
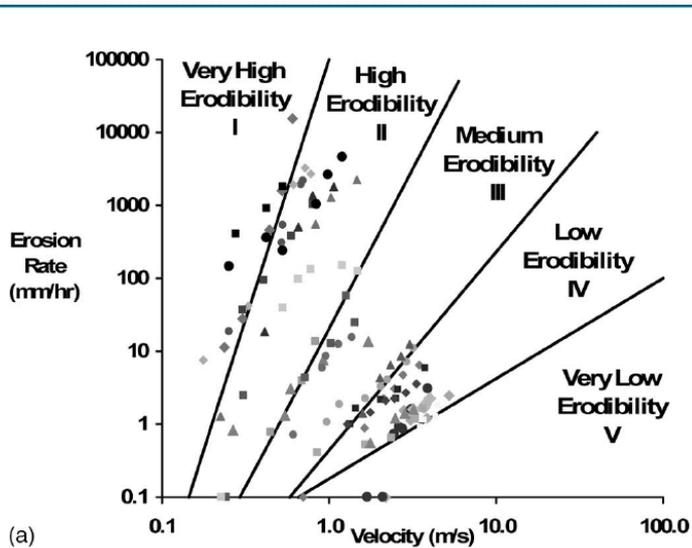
I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

MECCANISMI DI EROSIONE

Velocità di erosione in funzione della velocità del flusso d'acqua sul terreno in condizione di sormonto, per molte varietà di terreno e in diverse condizioni di compattazione.

Terreni molto erodibili → sabbie pulite poco compattate (in alto a sinistra).

Terreni poco erodibili → terreni coesivi, argillosi ben compattati (in basso a destra).



È possibile individuare dei terreni che hanno **INTRINSECAMENTE** le migliori caratteristiche dal punto di vista dell'erosione.

I RILEVATI ARGINALI – New Orleans e l'uragano Katrina

CONCLUSIONI TRATTE DALL'EVENTO:

1 Non è economicamente fattibile il proteggere aree molto esposte.

2 Molti dei danneggiamenti e delle rotture negli argini, in tutta la regione colpita dall'uragano, si sono verificati nei **PUNTI DI TRANSIZIONE**: dove differenti tipi e segmenti di argini si collegavano per costituire un fronte comune.



Enormi implicazioni per i sistemi di protezione di molte nazioni, i quali, tradizionalmente, sono stati completati in differenti fasi nel tempo.

3 L'utilizzo di materiali reperibili localmente e le modalità di posa in opera derivano dall'obiettivo di ridurre i costi iniziali di costruzione ma provocano un significativo incremento del rischio di successivi danneggiamenti.

GRAZIE