

REGIONE
PIEMONTE

DIGHE & INVASI

Manuale tecnico

PER LA PROGETTAZIONE, COSTRUZIONE E GESTIONE
DEGLI SBARRAMENTI ED INVASI DI COMPETENZA REGIONALE



Manuale

PER GLI SBARRAMENTI DI COMPETENZA REGIONALE

RISTAMPA LUGLIO 2011



INDICE

Introduzione

Ringraziamenti

CAPITOLO 1

ASPETTI IDRAULICI DEGLI SBARRAMENTI	11
1.1 Classificazione del tipo di sbarramento	11
1.2 Individuazione di classi di rischio	11
1.2.1 <i>Sbarramenti in progetto</i>	12
1.2.2 <i>Sbarramenti esistenti</i>	13
1.3 Caratteristiche generali del bacino imbrifero, dell'invaso e dello sbarramento	14
1.3.1 <i>Invasi in alveo</i>	15
1.3.2 <i>Invasi fuori alveo</i>	19
1.4 Valutazioni di carattere idraulico	21
1.4.1 <i>Invasi in progetto</i>	21
1.4.2 <i>Invasi esistenti</i>	24
1.5 Valutazioni idrauliche per il collasso dello sbarramento	26
1.6 Criteri di dimensionamento e verifica di uno sbarramento	27
1.6.1 <i>Dighe murarie in progetto</i>	27
1.6.2 <i>Dighe murarie esistenti</i>	31
1.6.3 <i>Dighe in materiale sciolto in progetto</i>	32
1.6.4 <i>Dighe in materiale sciolto esistenti</i>	34
1.6.5 <i>Traverse fluviali</i>	36
1.6.6 <i>Casse di espansione</i>	37
1.7 Piano di monitoraggio	38
1.7.1 <i>Strumentazione per il monitoraggio</i>	38
1.7.2 <i>Posizionamento della strumentazione</i>	40
1.7.3 <i>Piano di lettura della strumentazione e personale addetto</i>	40
1.8 Piano di manutenzione	41

CAPITOLO 2

CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA E GEOTECNICA	45
2.1 Indagini geognostiche	45
2.1.1 <i>Pozzetti esplorativi</i>	45
2.1.2 <i>Sondaggi con elica</i>	48
2.1.3 <i>Sondaggi a percussione</i>	48
2.1.4 <i>Sondaggi a rotazione</i>	48
2.1.5 <i>Descrizione degli strati mediante osservazioni e prove in sito</i>	51
2.1.6 <i>Valutazione della permeabilità</i>	54
2.1.7 Prove di laboratorio	54
2.2 Valutazioni conclusive	58
2.3 Ulteriori raccomandazioni per il materiale costituente il rilevato	61

CAPITOLO 3

ASPETTI PROGETTUALI	65
3.1 Contenuti della relazione geotecnica	65
3.2 Bacino d'invaso	65
3.2.1 Generalità	65
3.2.2 Stabilità dei pendii	66
3.2.3 Erosione	67
3.2.4 Isole	67
3.2.5 Sedimentazione	67
3.3 Progettazione del rilevato in terra	68
3.3.1 Generalità	68
3.3.2 Requisiti progettuali	69
3.3.3 Sezione omogenea non rivestita	70
3.3.4 Sezione omogenea rivestita	71
3.3.5 Sezione zonata	71
3.3.6 Sezione a diaframma	72
3.3.7 Considerazioni progettuali relative alla fondazione del rilevato	72
3.3.8 Vegetazione	76

3.3.9	Materiali di rivestimento	82
3.3.10	Geotessuti	88
3.3.11	Condotte	90

CAPITOLO 4

ASPETTI COSTRUTTIVI	97
4.1 Considerazioni generali	97
4.1.1 Condizioni climatiche	97
4.1.2 Limitazioni dell'area di lavoro	98
4.1.3 Vie d'accesso	99
4.2 Servizi	100
4.3 Movimentazione del terreno	101
4.3.1 Considerazioni generali	101
4.3.2 Controllo dell'acqua di ruscellamento e dell'acqua di falda	102
4.3.3 Macchinari utilizzati	103
4.3.4 Preparazione del sito	105
4.3.5 Aree di prestito	105
4.3.6 Costruzione del rilevato	106
4.3.7 <i>Compattazione del terreno</i>	107
4.4 Misure di controllo della filtrazione	113
4.4.1 <i>Taglione</i>	113
4.4.2 <i>Rivestimento in argilla del rilevato lato monte</i>	113
4.5 Drenaggio	114
4.5.1 <i>Trincee di drenaggio</i>	114
4.5.2 <i>Pozzetti di ispezione</i>	115
4.5.3 <i>Sistemi di drenaggio associati alle strutture</i>	116
4.5.4 <i>Manufatto di scarico</i>	116
4.5.5 <i>Geotessuti</i>	116
BIBLIOGRAFIA	119

INTRODUZIONE

Il presente manuale è stato redatto dalla Regione Piemonte, Direzione Difesa del Suolo, Settore Sbarramenti Fluviali di Ritenuta e Bacini di Accumulo in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Idraulica Trasporti e Infrastrutture Civili e il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del Politecnico di Torino, nonché con la Facoltà di Agraria dell'Università di Torino, al fine di definire un quadro generale in tema di sbarramenti di competenza regionale.

Esso si propone come strumento sussidiario per la progettazione, la costruzione e la gestione degli sbarramenti di competenza regionale, con particolare riferimento agli aspetti di carattere idraulico e geotecnico.

Con questo lavoro si è voluto offrire inoltre ai funzionari pubblici un metro oggettivo per l'istruttoria della documentazione stabilita dal regolamento di attuazione della L.R. n. 25/2003.

Il manuale deve considerarsi strettamente correlato al regolamento nazionale D.P.R. 1 novembre 1959 n.1363 e, in particolare, alle indicazioni tecniche contenute nel decreto del 24 marzo 1982, ancora valide per gli sbarramenti sopra i 10 metri di altezza e gli invasi maggiori o uguali a 100.000 m³P, e al regolamento regionale sopraccitato; nel primo capitolo del manuale vengono infatti specificate le grandezze da valutare per la richiesta di autorizzazione a nuove costruzioni o per la prosecuzione dell'esercizio e, anche nei seguenti capitoli, si fa riferimento alle classificazioni di rischio.

Inoltre, questo testo deve essere utilizzato per evidenziare eventuali scostamenti rispetto alla realtà, per gli invasi esistenti, o in progetto e conseguentemente ogni scelta o verifica effettuata dai professionisti tecnici incaricati deve essere validamente giustificata con particolare riferimento alla sicurezza e alla pubblica incolumità.

Il primo capitolo, di impronta più specificatamente idraulica, considera tutte le tipologie di sbarramento, mentre i capitoli che seguono fanno riferimento soprattutto a quelli in materiale sciolto; tale tipologia risulta la prevalente (circa l'80%) tra le opere denunciate finora. Tra tutti i tipi di sbarramento di competenza regionale, quelli in terra risultano spesso i più convenienti per la realizzazione di piccoli invasi, poiché sia il materiale da costruzione richiesto è facilmente reperibile nelle vicinanze dei siti di progetto, sia il grado di specializzazione richiesto per la realizzazione è modesto, così da consentire l'affidamento ad imprese di piccole dimensioni.

La trattazione geotecnica, dal secondo al quarto capitolo, è mirata non solo ad indagare il terreno di fondazione, ma anche a definire le caratteristiche del rilevato. L'attenzione è rivolta principalmente a definire la geometria e la tipologia dei materiali da costruzione del rilevato in materiale sciolto e ad esaminare il sito nel quale si vuole realizzare l'invaso.

Nei capitoli che affrontano i temi della progettazione e della costruzione degli sbarramenti, s'intendono fornire indicazioni di massima, utili per la scelta della tipologia di sbarramento, delle soluzioni per delineare graficamente le dimensioni degli invasi, degli accorgimenti per evitare l'infiltrazione o l'erosione delle sponde, delle strumentazioni e dei macchinari che meglio si prestano alla realizzazione degli invasi.

Nel manuale sono trattate solo marginalmente le metodologie di calcolo e le formule da utilizzare, demandando ai testi suggeriti nella parte di bibliografia la possibilità di approfondire tali argomenti in modo completo ed esaustivo.

Il presente manuale costituirà per l'amministrazione regionale la base per una serie di ulteriori approfondimenti, alcuni dei quali già in corso di elaborazione per quanto riguarda opere come le traverse, casse di espansione e per valutazioni e classificazioni connesse al rischio.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano per i contenuti tecnici-scientifici forniti per la stesura del manuale: Prof. Virgilio Anselmo, Prof. Luigi Butera, Ing. Silvia Longarelli, Prof. Renato Lancellotta, Prof. Mauro Battaglio, Prof. Daniele Costanzo, Ing. Guido Musso, Ing. Sebastiano Foti.



CAPITOLO 1

ASPETTI IDRAULICI DEGLI SBARRAMENTI



1 ASPETTI IDRAULICI DEGLI SBARRAMENTI

1.1 Classificazione del tipo di sbarramento

Le tipologie di sbarramento prese in esame nel presente capitolo sono le seguenti:

- a. Dighe murarie in generale;
 - a gravità ordinaria,
 - ad arco;
 - ad arco gravità;
- b. Dighe in materiale sciolto;
 - dighe in terra omogenee con o senza nucleo di tenuta;
 - dighe in pietrame zonate con nucleo di tenuta;
 - sbarramenti di altra natura;
- c. Traverse fluviali;
- d. Invasi per la laminazione delle piene.

1.2 Individuazione di classi di rischio

Per le finalità del presente Manuale si definiscono le classi di rischio descritte nel seguito. Tali classi di rischio risultano dalla correlazione tra rischio intrinseco (ai sensi del Regolamento D.P.G.R. 9 novembre 2004 n. 12/R) e appartenenza di un invaso a una delle categorie definite nel Regolamento stesso (art. 2). Per appartenere a una delle seguenti classi è sufficiente il verificarsi di una sola delle condizioni di rischio indicate.

1.2.1 Sbarramenti in progetto

	CATEGORIA C	CATEGORIA B	CATEGORIA A
LIVELLO 1 RISCHIO ALTO 1) Se a seguito del collasso dello sbarramento, nelle aree a valle risultino perdita di vite umane e rilevanti danni economici. In generale, si riferirebbero coinvolti agglomerati urbani o aree di espansione con numerose residenze. Le aree devono essere valutate in direzioni idraulicamente non trascurabili per una distanza a valle L pari a : $L = V/10^4$ Nel caso di invaso di volume fino a 60.000 m³ situato in aree montane o collinari con pendenze medie del primo km a valle dello sbarramento maggiori del 2%: $L = 2V/10^4$ L non dovrà comunque essere inferiore a 1km. 2) Situazione geologica a rischio frane a monte dello sbarramento; 3) Presenza di un elevato trasporto solido.	Classe di rischio 1N	Classe di rischio 2N	Classe di rischio 3N
LIVELLO 2 RISCHIO MODERATO Se a seguito del collasso dello sbarramento, nelle aree a valle risultino serie conseguenze ambientali o apprezzabili perdite economiche con danni a strutture commerciali o industriali, servizi pubblici o infrastrutture. La perdita di vite umane sarebbe improbabile. L'area viene indagata a valle, in direzioni idraulicamente non trascurabili, per una distanza L pari a : $L = V/10^4$ Nel caso di invaso di volume fino a 60.000 m³ situato in aree montane o collinari con pendenze medie del primo km a valle dello sbarramento maggiori del 2%: $L = 2V/10^4$ L non dovrà comunque essere inferiore a 1km.	Classe di rischio 4N	Classe di rischio 5N	Classe di rischio 6N
LIVELLO 3 RISCHIO BASSO Se a seguito del collasso dello sbarramento risultino perdite trascurabili sia sotto l'aspetto ambientale che economico. La perdita di vite umane sarebbe improbabile. L'area viene indagata a valle per una distanza L pari a : $L = V/10^4$ Nel caso di invaso di volume fino a 60.000 m³ situato in aree montane o collinari con pendenze medie del primo km a valle dello sbarramento maggiori del 2%: $L = 2V/10^4$ L non dovrà comunque essere inferiore a 1km.	Classe di rischio 7N	Classe di rischio 8N	Classe di rischio 9N

1.2.2 Sbarramenti esistenti

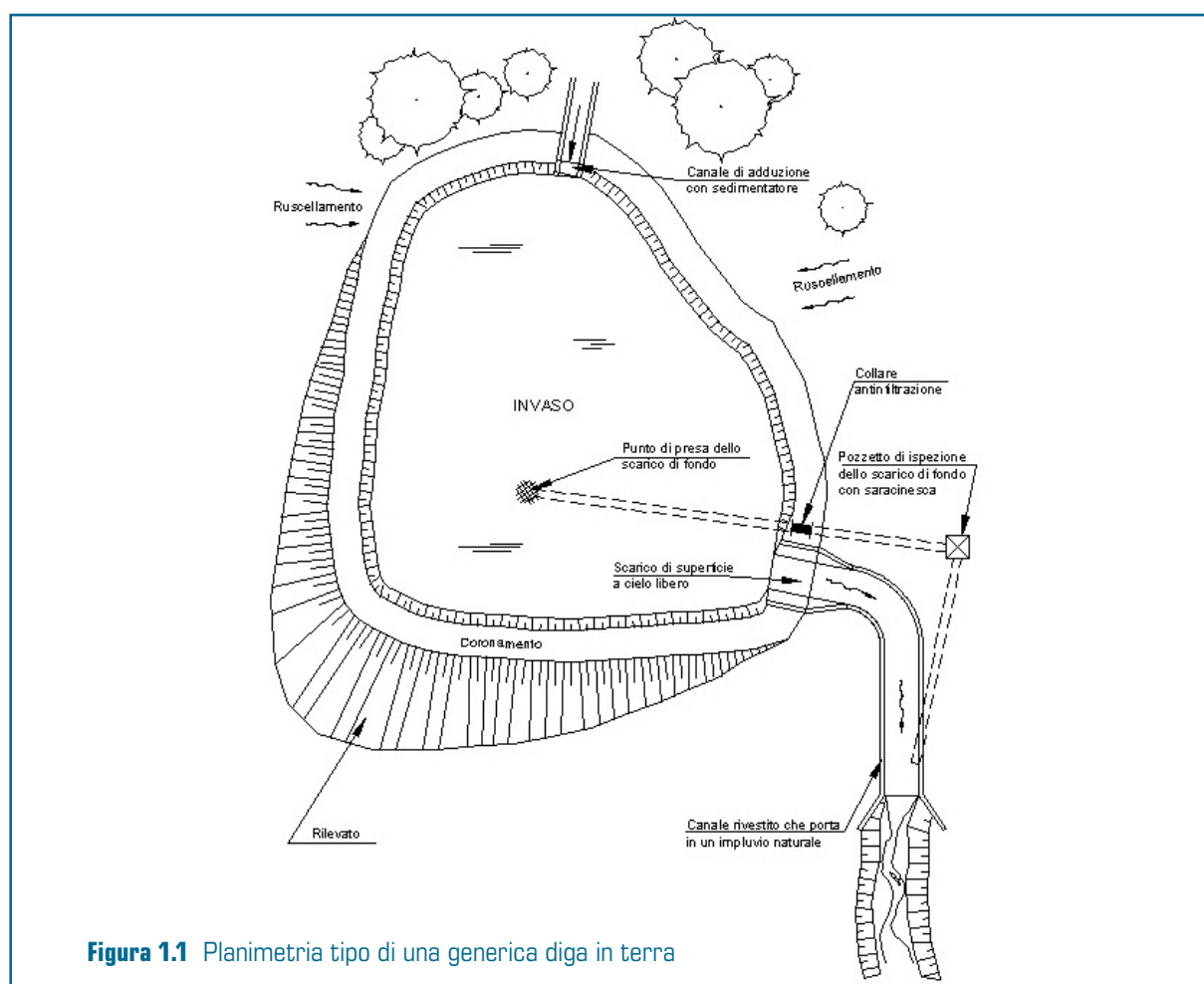
	Categoria C	Categoria B	Categoria A
LIVELLO 1 RISCHIO ALTO 1) Se a seguito del collasso dello sbarramento, nelle aree a valle risultino perdite di vite umane e rilevanti danni economici. In generale, si riterranno coinvolti agglomerati urbani o aree di espansione con numerose residenze. Le aree devono essere valutate in direzioni idraulicamente non trascurabili per una distanza a valle L pari a : $L = V/10^4$ Nel caso di invaso di volume fino a 60.000 m³ situato in aree montane o collinari con pendenze medie del primo km a valle dello sbarramento maggiori del 2%: $L = 2V/10^4$ L non dovrà comunque essere inferiore a 1km; 2) Presenza di infiltrazioni nel corpo diga, dalle spalle o dalle fondazioni; 3) Situazione geologica a rischio frane a monte dello sbarramento; 4) Assenza di organi di scarico; 5) Insufficiente dimensionamento dello sbarramento a fronte di elevate portate di piena; 6) Presenza di un elevato trasporto solido; 7) Cedimenti evidenti dello sbarramento.	Classe di rischio 1E	Classe di rischio 2E	Classe di rischio 3E
LIVELLO 2 RISCHIO MODERATO 1) Se a seguito del collasso dello sbarramento, nelle aree a valle risultino serie conseguenze ambientali o apprezzabili perdite economiche con danni a strutture commerciali o industriali, servizi pubblici o infrastrutture. La perdita di vite umane sarebbe improbabile. L'area viene indagata a valle, in direzioni idraulicamente non trascurabili, per una distanza L pari a : $L = V/10^4$ Nel caso di invaso di volume fino a 60.000 m³ situato in aree montane o collinari con pendenze medie del primo km a valle dello sbarramento maggiori del 2%: $L = 2V/10^4$ L non dovrà comunque essere inferiore a 1km. 2) Presenza di scarichi di fondo che attraversano sbarramenti in terra; 3) Errato dimensionamento o posizionamento degli organi di scarico; 4) Situazione geologica non definita a monte del rilevato; 5) Mancata manutenzione dello sbarramento, prevalentemente per quelli in materiale sciolto.	Classe di rischio 4E	Classe di rischio 5E	Classe di rischio 6E
LIVELLO 3 RISCHIO BASSO 1) A seguito del collasso dello sbarramento risultino perdite trascurabili sia sotto l'aspetto ambientale che economico. La perdita di vite umane sarebbe improbabile. L'area viene indagata a valle per una distanza a valle L pari a : $L = V/10^4$ Nel caso di invaso di volume fino a 60.000 m³ situato in aree montane o collinari con pendenze medie del primo km a valle dello sbarramento maggiori del 2%: $L = 2V/10^4$ L non dovrà comunque essere inferiore a 1km. 2) Mancata manutenzione degli organi di scarico.	Classe di rischio 7E	Classe di rischio 8E	Classe di rischio 9E

1.3 Caratteristiche generali del bacino imbrifero, dell'invaso e dello sbarramento

Per la corretta progettazione e per la gestione di uno sbarramento dovranno essere note le caratteristiche generali del bacino imbrifero, dell'invaso e dell'opera.

Nel caso di sbarramento in progetto la descrizione del bacino imbrifero dovrà essere preceduta da una descrizione delle zone geografiche in cui è collocato il bacino imbrifero, nonché dalla descrizione degli scopi per cui si intende realizzare lo sbarramento.

Gli schemi tipo della planimetria e della sezione di un invaso generico sono rappresentati in Figura 1.1 e Figura 1.2.



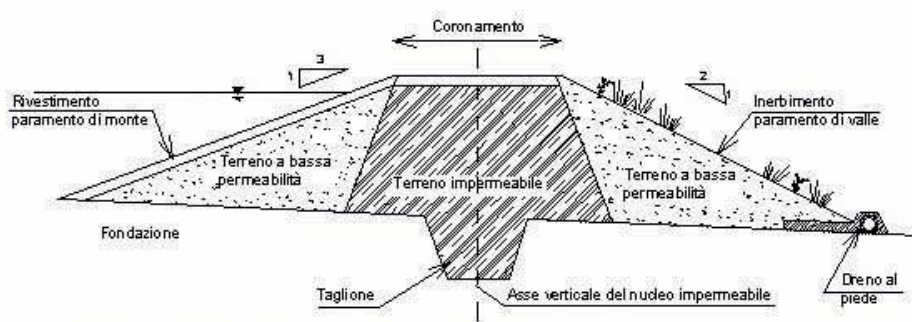


Figura 1.2 Schema tipo di una generica diga in terra

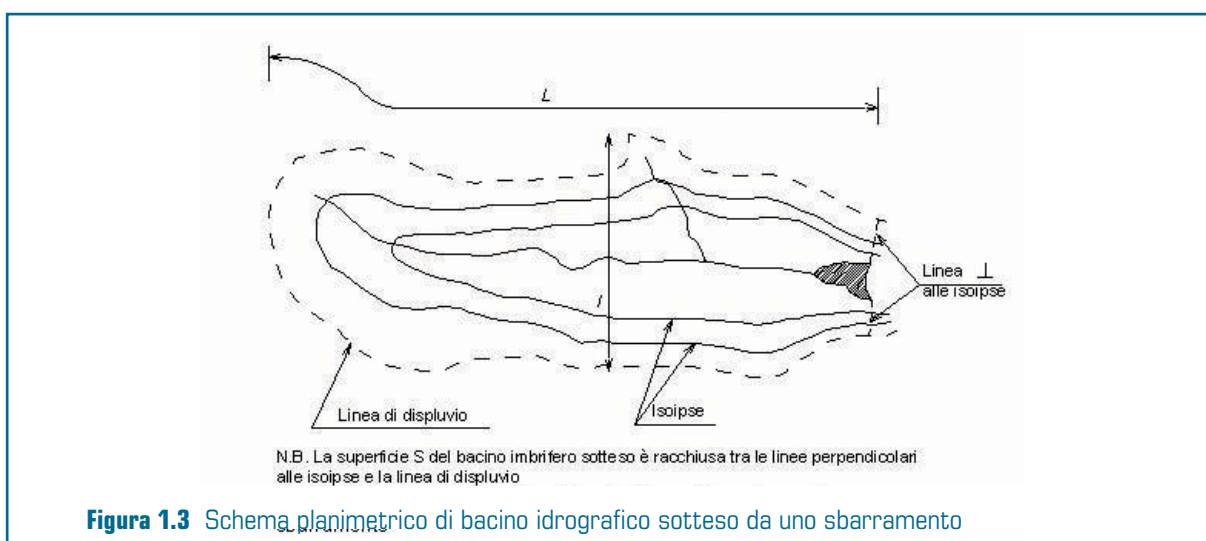
1.3.1 Invasi in alveo

Bacino imbrifero sotteso

Il bacino imbrifero sotteso dallo sbarramento o dalla traversa dovrà essere analizzato e descritto, in modo da caratterizzarlo con i seguenti dati:

- lunghezza L (Figura 1.3);
- larghezza massima I (Figura 1.3);
- larghezza media;
- pendenza dei versanti;
- quota massima del bacino imbrifero sotteso;
- quota minima del bacino imbrifero sotteso dal previsto sbarramento;
- curva ipsografica;
- numero degli affluenti principali del corso d'acqua oggetto di sbarramento, distinguendo quelli ubicati a monte e a valle dello stesso sbarramento (per un tratto significativo);
- instabilità (frane) in atto o potenziali nelle aree adiacenti all'invaso e presenza di eventuali opere di mitigazione del rischio;
- analisi geologica e geomorfologica del bacino. Nel caso in cui lo sbarramento sia in progetto il dettaglio previsto è superiore: in particolare è richiesta la descrizione litologico-stratigrafica di dettaglio dell'area di collocazione dell'invaso fino ad un intorno significativo, secondo le procedure indicate dal D.M. 11 marzo 1988;
- uso del suolo nelle aree circostanti lo sbarramento e in generale in tutto il bacino;

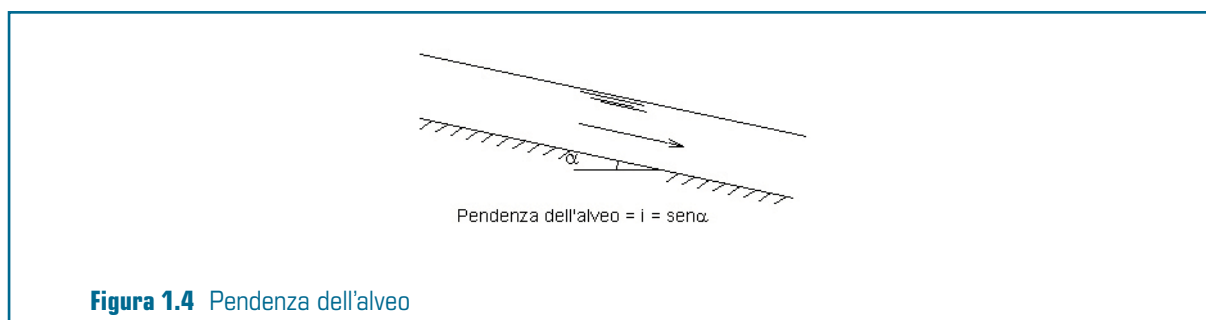
- stazioni nivo-pluviometriche-pluviografiche presenti nel bacino imbrifero sotteso o in prossimità dello stesso;
 - stazioni idrometriche / idrometrografiche presenti nel bacino imbrifero sotteso.
- Per gli sbarramenti diretti esistenti si dovrà definire inoltre la quota di fondo dell'alveo sbarrato.



Caratteristiche del corso d'acqua interessato

Per un ampio tratto sia a monte, sia a valle dello sbarramento, il corso d'acqua interessato dovrà essere idoneamente descritto dalle seguenti tipologie di dati:

- situazione geomorfologica generale;
- larghezza media dell'alveo;
- lunghezza del corso d'acqua a monte dello sbarramento;
- pendenza dell'alveo: $i = \sin \alpha$ (Figura 1.4)
- scabrezza media dell'alveo;
- eventuale presenza di arginature, opere di difesa spondale, opere trasversali, nonché altri tipi di opere interferenti con il regime idraulico.



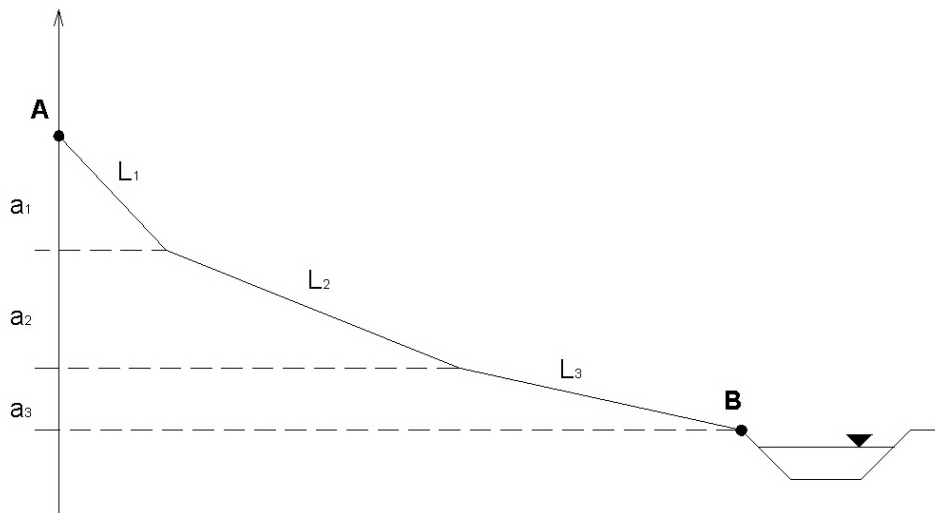


Figura 1.5 Schema grafico per il calcolo della pendenza del corso d'acqua che evolve da A a B

$$i_1 = \frac{a_1}{L_1} \quad i_2 = \frac{a_2}{L_2} \quad i_3 = \frac{a_3}{L_3}$$

Poichè la velocità dell'acqua è $\approx \sqrt{i}$ e il tempo per andare da A a B è all'incirca proporzionale a $\frac{L_1}{\sqrt{i_1}} + \frac{L_2}{\sqrt{i_2}} + \frac{L_3}{\sqrt{i_3}}$, la pendenza media legata allo scorrimento della corrente dell'acqua è:

$$\sqrt{i_{\text{media}}} = \frac{\sum L_i}{\sum \frac{L_i}{\sqrt{i_i}}}$$

da cui:

$$i_{\text{media}} = \frac{(\sum L_i)^2}{\left(\sum \frac{L_i}{\sqrt{i_i}}\right)^2}$$

Caratteristiche degli affluenti del corso d'acqua interessato

Come per il corso d'acqua interessato dallo sbarramento, anche per gli affluenti principali dello stesso è necessario definire:

- situazione geomorfologica generale;
- larghezza media;
- pendenza media dell' alveo;
- scabrezza media dell'alveo;
- eventuale presenza di arginature, opere di difesa spondale, opere trasversali, nonché altri tipi di opere interferenti con il regime idraulico.

Caratteristiche generali dell'invaso e dello sbarramento

Per quanto riguarda l'invaso dovranno essere forniti i seguenti dati:

- volume massimo d'invaso (Figura 1.6): è il volume corrispondente alla quota massima di sfioro;

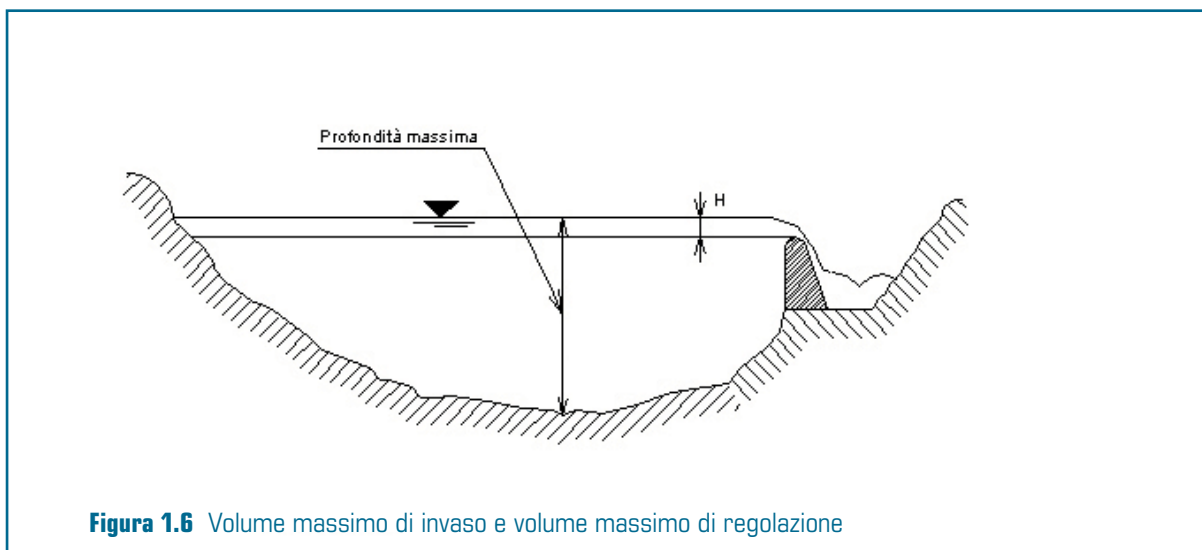


Figura 1.6 Volume massimo di invaso e volume massimo di regolazione

- volume massimo di regolazione (Figura 1.6): è il volume corrispondente all'incipiente sfioro;
- profondità massima e media dell'acqua invasata (volume massimo/superficie massima);
- superficie massima e minima dello specchio liquido;
- perimetro dello specchio d'acqua in funzione dei diversi livelli di ritenuta (massimo e minimo);
- frazione del perimetro interessata dallo sbarramento;
- rapporto tra la superficie dello specchio liquido e il perimetro (relativi al volume massimo).

Dovranno inoltre essere fornite le caratteristiche tecniche dello sbarramento con riferimento alle tipologie e alle classi definite nel paragrafo 1.2.

Analisi idrologica ed elaborazioni statistiche

Analisi relativa alle precipitazioni sul bacino imbrifero

Per uno sbarramento di qualsiasi tipologia dovrà essere presentato lo studio delle curve di possibilità climatica, svolto con i metodi di Gumbel e TCEV, per tempi di ritorno pari a $T_r = 50$; 100; 200 anni, per le stazioni presenti nel bacino e quelle ad esso limitrofe.

Valutazione delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno nella sezione dello sbarramento

Per una corretta verifica delle opere, dovrà essere presentata la valutazione dell'entità della portata di piena afferente al serbatoio per $T_r = 50$; 100; 200 anni.

In assenza di valutazioni più approfondite, la forma dell'onda di piena afferente al serbatoio sarà essere assunta convenzionalmente crescente linearmente da zero al valore massimo in un tempo pari al tempo di corrivazione, nonché successivamente decrescente dal valore massimo a zero in un tempo pari a tre volte quello di corrivazione.

Dovrà inoltre essere presentato lo studio della propagazione dell'onda di piena in caso di rottura dello sbarramento per tutti gli invasi (si veda anche il paragrafo 1.5).

Trasporto solido

Sarà necessario definire il trasporto solido, valutando granulometria, entità annuale del volume trasportato in condizioni normali ed entità di trasporto durante gli eventi di piena.

1.3.2 Invasi fuori alveo

Bacino imbrifero sotteso

Il bacino imbrifero sotteso dallo sbarramento dovrà essere caratterizzato con i seguenti dati:

- lunghezza;
- larghezza massima;
- larghezza media;
- pendenza media dei versanti;
- quota massima del bacino imbrifero;
- curva ipsografica;
- numero di rii presenti nel bacino, anche se non direttamente affluenti nell'invaso;
- quota del punto più depresso dell'invaso;
- analisi geologica e geomorfologica del bacino. Nel caso in cui lo sbarramento sia in progetto il

dettaglio previsto è superiore: in particolare è richiesta la descrizione litologico-stratigrafica di dettaglio dell'area di collocazione dell'invaso fino ad un intorno significativo, secondo le procedure indicate dal D.M. 11 marzo 1988;

- instabilità (frane) in atto o potenziali nelle aree adiacenti l'invaso ed eventuale presenza di opere di mitigazione del rischio;
- uso del suolo nelle aree circostanti lo sbarramento e in generale in tutto il bacino;
- stazioni nivo – pluviometriche - pluviografiche presenti nel bacino imbrifero sotteso o in prossimità dello stesso.

Nei casi in cui vi siano portate affluenti direttamente in invasi fuori alveo attraverso canali adduttori o sorgenti, deve essere effettuata la misura di queste portate, ai fini della sicurezza dello sbarramento e del controllo del volume d'invaso utilizzato.

Analisi idrologica ed elaborazioni statistiche

Analisi relativa alle precipitazioni sul bacino imbrifero

Per uno sbarramento di qualsiasi tipologia dovrà essere presentato lo studio delle curve di possibilità climatica, svolto con i metodi di Gumbel e TCEV, per tempi di ritorno pari a $Tr = 50$; 100 e 200 anni, per le stazioni presenti nel bacino e ad esso limitrofe.

Valutazione delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno nella sezione dello sbarramento

Per una corretta verifica delle opere, dovrà essere presentata la valutazione dell'entità della portata di piena afferente al serbatoio per $Tr = 50$; 100; 200 anni.

In assenza di valutazioni più approfondite, la forma dell'onda di piena afferente al serbatoio sarà assunta convenzionalmente crescente linearmente da zero al valore massimo in un tempo pari al tempo di corrivazione, nonché successivamente decrescente dal valore massimo a zero in un tempo pari a tre volte quello di corrivazione.

Dovrà inoltre essere presentato lo studio della propagazione dell'onda di piena in caso di rottura dello sbarramento per tutti gli invasi (si veda anche il paragrafo 1.5).

Trasporto solido

Sarà necessario definire il trasporto solido, valutando granulometria, entità annuale del volume trasportato in condizioni normali ed entità di trasporto durante gli eventi di piena.

1.4 Valutazioni di carattere idraulico

1.4.1 Invasi in progetto

Dimensionamento dello scarico di superficie

Lo scarico di superficie di uno sbarramento sarà costituito da un profilo tracimante ad asse per quanto possibile rettilineo, seguito da canale collettore e fugatore a cielo aperto.

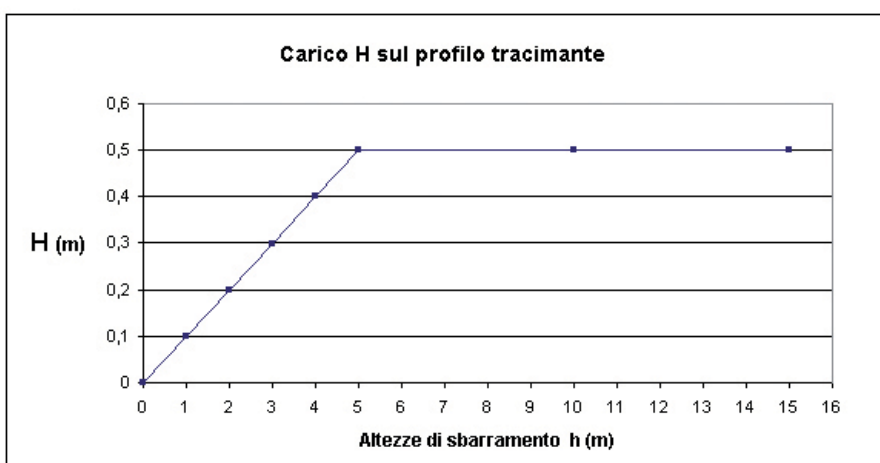
I carichi (H) sul profilo tracimante saranno assunti come segue:

$$H = 0.1 \cdot h \text{ m}$$

per sbarramenti con altezza h compresa tra: $0 < h \leq 5 \text{ m}$

$$H = 0.5 \text{ m}$$

per sbarramenti con altezza h compresa tra: $5 < h < 10 \text{ m}$



E' consigliato assumere lo stesso valore per le dighe di classi 1N, 4N e 7N.

Nel dimensionamento dello scarico di superficie sarà inoltre necessario:

- trascurare l'effetto della laminazione;
- realizzare lo scarico di superficie e il canale collettore in calcestruzzo armato (in particolare per gli sbarramenti in materiale sciolto);
- dimensionare gli scarichi secondo portate derivanti dalle valutazioni idrologiche con tempo di ritorno pari ad almeno 200 anni;
- mantenere l'altezza del franco nel canale di gronda e nel canale collettore, tenendo conto degli effetti di eventuali curve, in modo da rispettare le seguenti condizioni:

- classi 3N, 6N e 9N: da 0.3 m a 0.5 m sul pelo libero;
- per tutte le altre classi: da 0.5 m a 0.8 m sul pelo libero.

Dimensionamento dello scarico di fondo

Lo scarico sarà costituito da due condotte in parallelo, ciascuna con diametro non inferiore a:

- Sbarramenti di classi 1N, 4N e 7N: 1 m;
- sbarramenti di classi 2N, 5N e 8N: 0.8 m;
- sbarramenti di classi 3N, 6N e 9N: 0.6 m.

Esso deve avere esclusivamente un compito di svuotamento del serbatoio.

Sull'imbocco dello scarico di fondo dovrà essere posizionata una griglia di ampia superficie, per impedire che il materiale trasportato dall'acqua intasi lo stesso scarico. Va previsto, inoltre, il posizionamento di un organo di intercettazione in camera di accesso con botola.

Lo scarico di fondo non deve mai attraversare uno sbarramento in materiale sciolto. Tale scarico deve aggirare la diga con un ampio raggio di curvatura e un tratto terminale per quanto possibile rettilineo. La camera di accesso con botola all'organo di intercettazione separerà il tratto di scarico di fondo con andamento planimetrico curvilineo con il tratto ad andamento rettilineo.

Per quanto riguarda gli invasi realizzati mediante dighe in calcestruzzo è comunque consigliato che lo scarico di fondo abbia le caratteristiche sopra descritte.

Dimensionamento del canale fuggatore

Nel dimensionamento del canale fuggatore, è necessario prevedere franchi non inferiori a 0.8 m, tenendo conto dell'effetto di eventuali curve, nonché il posizionamento di dissipatori a risalto al loro termine.

Il collettore avrà una pendenza di fondo dell'ordine di qualche unità per mille.

In relazione alle sensibili pendenze del canale fuggatore, detto fuggatore sarà dotato al termine di un dissipatore, preferibilmente a risalto, con il compito di fare defluire la portata di piena in alveo in condizioni naturali, vale a dire come se detta portata defluisse in alveo in assenza dell'invaso e delle corrispondenti opere di scarico.

Con riferimento alla Figura 1.7, il profilo tracimante si determina utilizzando la seguente espressione:

$$\left(\frac{Y}{H}\right) = 0.47 + 0.48\left(\frac{X}{H}\right)^{1.8}$$

Il ciglio sfiorante del profilo tracimante non dovrà essere rigurgitato dal tirante che si viene a realizzare nel canale collettore, e più specificatamente, nella sezione di monte del canale collettore. Si consiglia un dislivello tra il ciglio sfiorante e il tirante idrico nella sezione di monte del collettore non inferiore a 0.2 m.

Il paramento di valle della struttura tracimante seguirà il profilo SCIMEMI opportunamente maggiorato. La sponda opposta del canale collettore avrà una scarpa idonea per, eventualmente, sostenere il versante in cui il collettore è stato realizzato.

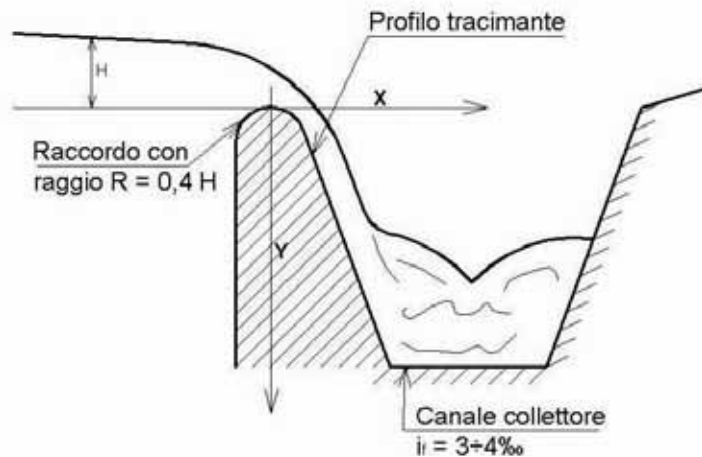


Figura 1.7 Profilo tracimante e canale collettore

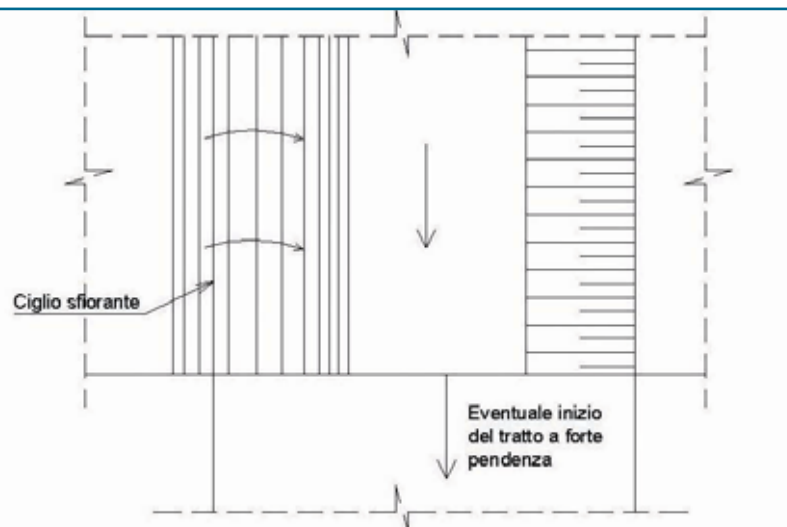
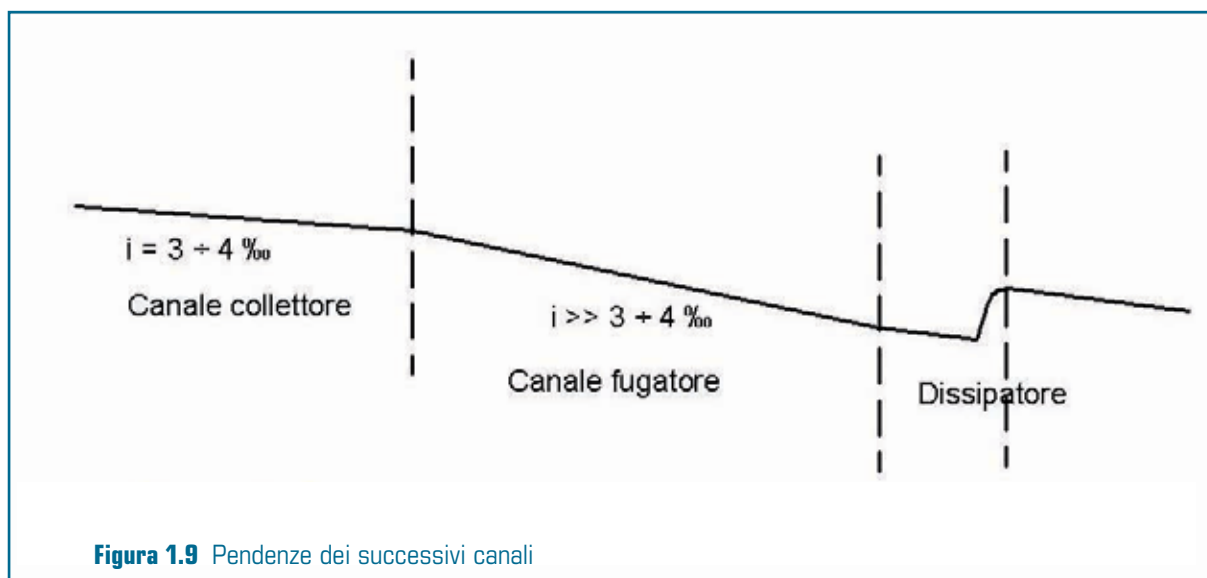


Figura 1.8 Profilo tracimante e canale del collettore



Dimensionamento delle bocche di presa e del canale adduttore

Per un corretto dimensionamento del canale adduttore, in sede di progetto, va presa in considerazione una velocità dell'acqua non superiore a:

- 0.5 m/s (lorda) alla bocca di presa;
- 1 m/s per canali in terra;
- 1.5 m/s per canali artificiali (a pelo libero e/o in pressione).

L'eventuale manufatto partitore dovrà essere realizzato in cemento armato e dovrà possedere una soglia di sfioro che adduca le acque eventualmente non ripartite ad un idoneo canale ricettore.

1.4.2 Invasi esistenti

Dimensionamento dello scarico di superficie

In sede di controllo e di messa in sicurezza di strutture esistenti si rende necessario:

- il calcolo della portata effettiva scaricabile dal manufatto esistente;
- il confronto tra la portata scaricabile dal manufatto esistente con quella calcolata come al paragrafo 1.4.1 (eventualmente integrata con la portata derivante dal bacino imbrifero sotteso dall'invaso fuori alveo). Da tale confronto potrà derivare un nuovo dimensionamento del manufatto tracimante;
- mantenere l'altezza del franco nel canale di gronda e nel canale collettore, tenendo conto degli effetti di eventuali curve, in modo da rispettare le seguenti condizioni:

- classi 3E, 6E e 9E: da 0.3 m a 0.5 m sul pelo libero;
- per tutte le altre classi: da 0.5 m a 0.8 m sul pelo libero.

Dimensionamento dello scarico di fondo

Lo scarico di fondo non deve mai attraversare uno sbarramento in materiale sciolto ed inoltre, deve avere esclusivamente un compito di svuotamento ordinario del serbatoio.

Per le diverse classi di sbarramenti lo scarico di fondo dovrà avere un diametro non inferiore a:

- classi 1E; 4E e 7E: 0.8 m;
- classi 2E; 5E e 8E: 0.6 m;
- classi 3E; 6E e 9E: 0.5 m.

Sull'imbocco dello scarico di fondo dovrà essere posizionata una griglia per impedire al materiale trasportato dall'acqua di intasare lo stesso scarico; periodicamente dovrà essere asportato il materiale che, depositandosi sulla griglia, può provocarne l'occlusione.

Va previsto, inoltre, il posizionamento di un organo di intercettazione in camera di accesso con botola.

1.5 Valutazioni idrauliche per il collasso dello sbarramento

Valutazione dell'onda di piena a valle dello sbarramento

Lo studio dell'onda di piena conseguente alla rottura dello sbarramento dovrà essere condotto ipotizzando una rottura parziale o totale dello sbarramento, per individuare:

- i tiranti idrici della zona in cui l'acqua fluisce;
- le velocità massime dell'acqua;
- l'entità delle dimensioni medie del materiale solido trasportato;
- la durata dell'evento globale.

Indagini topografico – altimetriche

Ai fini della valutazione dell'onda di piena conseguente la rottura dello sbarramento, le indagini topografico – altimetriche dovranno avere estensioni direzionali idraulicamente significative (con grado di dettaglio proporzionato alla classe di rischio in cui ricade lo sbarramento) pari a:

- Classi 1N e 1E : 3 km;
- Classi 2N e 2E: 2 km;
- Classi 3N e 3E: 1 km;
- Classi 4N e 4E: 2 km;
- Classi 5N e 5E: 1.5 km;
- Classi 6N, 7N, 6N, 9N, 6E; 7E; 8E e 9E: 1 km.

Tali indagini dovranno comunque essere estese congruamente, almeno fino ad infrastrutture esistenti a valle: strade e/o ferrovie in rilevato, ponti, nonché fabbricati civili, rurali ecc.

Indagini sull'erodibilità dei terreni

Ai fini della valutazione dell'onda di piena conseguente la rottura dello sbarramento l'indagine sull'erodibilità dei terreni dovrà individuare:

- l'uso del suolo in atto o prevedibile nelle aree circostanti;
- la copertura vegetale attuale o prevedibile;
- la granulometria desunta da scavi di almeno 1.5 m di profondità.

1.6 Criteri di dimensionamento e verifica di uno sbarramento

1.6.1 Dighe murarie in progetto

Vengono definiti i seguenti principi generali per il progetto e il dimensionamento delle dighe murarie. La larghezza del coronamento non dovrà in nessun caso essere inferiore a 4 m in sede di progetto di nuovi sbarramenti.

Per quanto riguarda le azioni sismiche sulla struttura, fatto salvo quanto previsto sulle Norme tecniche del 24 marzo 1982 per gli sbarramenti di categoria C, si considereranno azioni ondulatorie solo da monte verso valle e viceversa, nonché azioni sussultorie solo dall'alto al basso e viceversa.

Le sollecitazioni principali di compressione saranno non superiori a $1/4$ della resistenza caratteristica di cui alla legge 5/11/71 n°1086.

Non sono ammesse sollecitazioni di trazione.

In sede di verifica il rapporto T/N (N : risultante delle forze verticali; T : risultante delle forze orizzontali) non dovrà essere superiore a 0.75, anche in presenza di azioni sismiche.

Il franco dovrà essere maggiore o uguale a 1 m.

Dighe a gravità ordinaria

Per il dimensionamento e la verifica di sbarramenti a gravità ordinaria dovranno essere osservate le seguenti indicazioni:

- $\tan \alpha > 0.75$; $\tan \beta > 0.03$ (Figura 10);

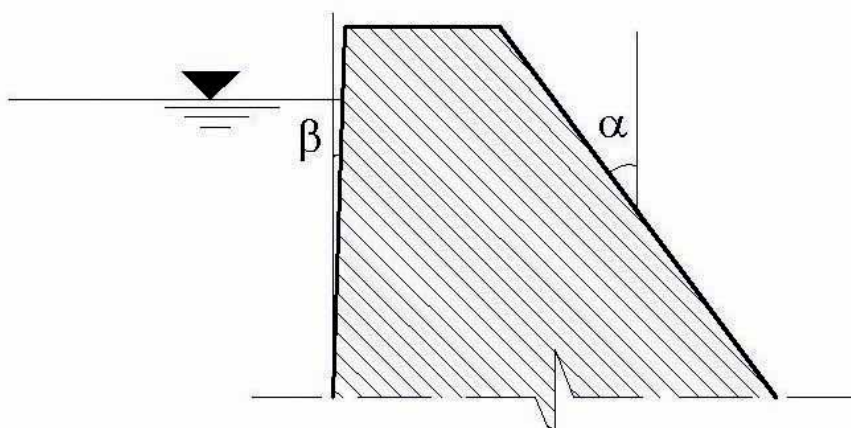


Figura 1.10 Pendenza del paramento

- sottopressioni con γy al lembo di monte, $0,5 \cdot \gamma y$ in corrispondenza dell'asse delle canne di drenaggio (Figura 1.11);
- sottopressioni nulle al lembo di valle (Figura 1.11);
- sono da ritenere trascurabili le azioni sismiche dell'acqua e la spinta del ghiaccio;
- azioni sismiche della struttura valutate come previsto nel par.1.6.3;
- non sono ammesse sollecitazioni di trazione;
- è necessaria la presenza di canne di drenaggio di almeno 0.25 m di diametro intervallate di non più di 2.5 m (Figura 1.12);
- è necessaria la presenza di un cunicolo di ispezione al piede.

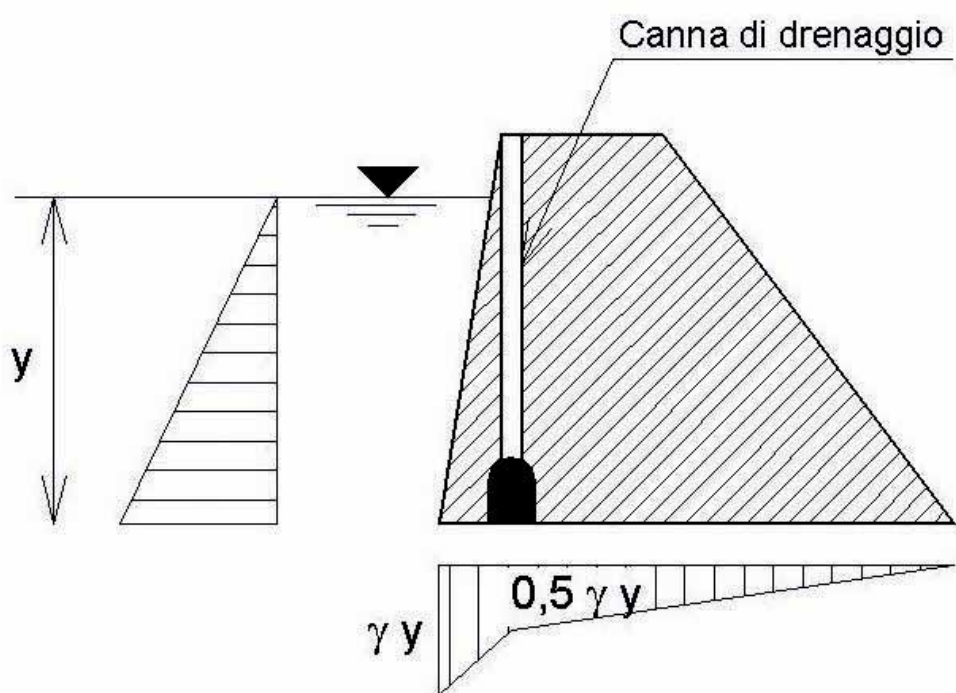


Figura 1.11 Sottopressioni



Figura 1.12 Canne di drenaggio

Dighe ad arco

In sede di progettazione di uno sbarramento ad arco, l'arco di coronamento sarà realizzato in aggetto per consentire il passaggio di mezzi per il controllo della struttura.

Gli archi inferiori avranno spessori preferibilmente non inferiori al 20% dell'altezza della struttura.

E' ammessa la verifica per archi indipendenti.

Dighe ad arco gravità

La struttura ad arco gravità verrà proporzionata preferibilmente con andamento quadratico dello spessore. Lo spessore alla base sarà non inferiore al 40% dell'altezza e quello superiore non inferiore al 10% dell'altezza.

La passerella di coronamento poggerà libera su montanti spiccanti dall'arco superiore, in modo da non modificare il funzionamento della struttura sottostante.

Raccomandazioni

Cementi

Per la realizzazione di uno sbarramento verranno utilizzati preferibilmente cementi di tipo pozzolanico o, almeno, derivanti da miscele di cementi Portland e pozzolanici. Si consiglia anche l'uso di cementi ferrici.

Il rapporto acqua / cemento non dovrà essere superiore a 0.5. Per i getti sotto squadro tale rapporto dovrà essere convenientemente ridotto e verranno, inoltre, utilizzati idonei fluidificanti.

Inerti

Per gli sbarramenti in calcestruzzo sono da prevedere inerti non gelivi e provenienti da frantumazione. Le curve granulometriche dovranno seguire indicativamente quella di Fuller.

Scelta del tipo di sbarramento in relazione al sito

Qualora la larghezza della sezione valliva, valutata alla quota di altezza dello sbarramento realizzando, sia inferiore a tre volte l'altezza dello sbarramento potranno essere proposte dighe ad arco-gravità o ad arco.

Fondazioni

La struttura di una diga dovrà inserirsi su roccia impermeabile o resa tale mediante schermo di iniezione.

La diga a gravità dovrà poggiare su un tratto lievemente ascendente verso valle, esente, per quanto possibile, da gradini.

Le dighe ad arco o ad arco-gravità saranno dotate di un pulvino che raccorderà la struttura alla sezione della valle resa simmetrica per quanto possibile.

Verifiche di calcolo

Le dighe ad arco e ad arco gravità potranno essere verificate per archi indipendenti, fatta salva, per dighe ad arco gravità, la ripartizione della pressione esterna alle varie quote, tra archi e mensole conseguente alla geometria che il progettista ha assegnato alla diga.

Aspetti significativi della realizzazione degli sbarramenti

Per la realizzazione di uno sbarramento in calcestruzzo si procederà per conci di larghezza non superiore ai 15 m. Ciascun concio crescerà in altezza per getti non superiori a 3 m, sfalsato rispetto agli altri adiacenti per poter dissipare buona parte del calore di idratazione e presa.

Per le dighe a gravità, le facce adiacenti di ciascun concio verranno opportunamente bitumate.

Per le dighe ad arco e ad arco-gravità la sigillatura tra concio e concio verrà effettuata quando la temperatura raggiungerà il valore minimo nella struttura.

Tutte le dighe in precedenza richiamate saranno dotate di giunti di tenuta, preferibilmente di tipo "Waterstop".

Pozzi di ispezione e canne di drenaggio

Nelle dighe a gravità i pozzi di ispezione e le canne di drenaggio avranno rispettivamente un diametro di circa 0.80 m e 0.20 m. Essi dovranno essere visibili da una galleria di ispezione ubicata nella parte inferiore della diga.

Un'ideale canaletta ubicata a pavimento nella galleria di ispezione convoglierà le acque di filtrazione a un misuratore delle portate complessivamente filtranti.

Le dighe ad arco e ad arco-gravità saranno preferibilmente dotate di una sola galleria con piano - pavimento al collegamento tra pulvino e struttura.

1.6.2 Dighe murarie esistenti

Per le dighe a gravità ordinaria, ad arco, ad arco-gravità dovranno essere verificate le seguenti condizioni conseguenti a peso proprio, spinta dell'acqua, sottopressioni, azioni sismiche della struttura (par. 1.6.3):

- sollecitazioni principali di compressione non superiori a 40 daN/cm^2 ,
- rapporto T/N non superiore a 0.75;
- non sono ammesse sollecitazioni di trazione;
- il coronamento dovrà avere larghezza non minore a 2.5 m;
- il franco dovrà essere non minore ad 1 m.

1.6.3 Dighe in materiale sciolto in progetto

Vengono considerate in questo paragrafo due principali tipologie di sbarramento in materiale sciolto: dighe omogenee e dighe disomogenee (ovvero con porzioni significative costituite da differenti tipi di materiali sciolti). Si sottolinea in ogni caso che non sono ammessi sbarramenti con tratti in terra e altri tratti di diversa natura in sede di progetto.

Per entrambe le tipologie di sbarramento in materiale sciolto dovranno essere rispettate le seguenti condizioni:

– *Inclinazione dei paramenti*: essa deve essere giustificata in termini di stabilità globale dell'opera. Inoltre è necessario il mantenimento dell'inerbimento dei paramenti, nonché la presenza di idonei rinfianchi se l'alveo presenta pendenze superiori all' 1%.

– *Larghezza del coronamento*:

- classi 1N, 4N e 7N: larghezza ≥ 3.5 m;
- altre classi: larghezza ≥ 3 m.

Per ogni classe è comunque consigliata una larghezza non inferiore a 4 m;

– *Franco*: la differenza fra la quota del coronamento e la quota di massimo invaso deve essere compresa tra i seguenti valori (h = altezza dello sbarramento):

- classe 9N: 0.5 m per $h \leq 2$ m e da 0.5 m a 1 m per $2 < h \leq 5$ m;
- classi 3N e 6N: da 1 m a 1.5 m;
- classi 2N, 5N e 8N: da 1 m a 1.5 m;
- classi 1N, 4N e 7N: non inferiore a 1.5 m.

Per le dighe in materiali sciolti disomogenee, oltre alle indicazioni suddette, devono essere rispettate le seguenti condizioni:

- *Nucleo interno di tenuta*: deve essere realizzato in argilla;
- non sono ammessi taglioni interni e manti di tenuta esterni in calcestruzzo.

Verifiche essenziali

Verifiche di stabilità

Le dighe in materiali sciolti dovranno esplicitamente soddisfare le verifiche di stabilità, garantendo in condizioni statiche un idoneo fattore di sicurezza.

La verifica andrà condotta:

- a costruzione ultimata (in assenza di volumi invasati) e per ogni fase costruttiva qualora la realizzazione procedesse per fasi, il fattore di sicurezza (F_s) dovrà essere maggiore di 1.3;
- in regime stazionario con massimo invaso (verifica con tensioni efficaci), il fattore di sicurezza (F_s) dovrà essere maggiore di 1.4;
- in condizioni di rapido svasso, il fattore di sicurezza (F_s) dovrà essere maggiore di 1.2.

La stabilità dovrà essere assicurata lungo superfici interessanti sia il solo rilevato sia l'insieme rilevato – terreno di fondazione.

Qualora l'invaso rientri in area sismica, le verifiche andranno condotte anche tenendo conto in forma pseudo-statica delle azioni sismiche, assicurando che $F_s \geq 1.2$. Ciò verrà fatto introducendo:

1. un'azione orizzontale parallela alla sezione maestra dell'invaso pari a $F_h = CW$, dove $C = (S-2)/100$ è il coefficiente di intensità sismica, $S (\geq 2)$ il grado di sismicità, W il peso specifico della struttura;
2. un'azione verticale di intensità $F_v = 0.5 CW$.

Per gli invasi di categoria 9N le verifiche di stabilità potranno essere omesse in condizioni progettuali di paramenti aventi pendenza pari a 1/3 o inferiori e con terreni di caratteristiche meccaniche tali da escludere rotture per capacità portante o cedimenti che modifichino la configurazione geometrica del paramento.

Verifiche di rottura locale

Nel caso di configurazioni geometriche-strutturali predisponenti a rotture locali o per significative discontinuità stratigrafiche, andrà effettuata la verifica a sifonamento. Il margine di sicurezza dovrà risultare adeguato agli scenari di rischio.

Cedimenti

Il progetto degli invasi di categoria B e C dovrà includere il calcolo dei cedimenti assoluti e differenziali dell'opera nell'arco della sua vita.

Si dovrà dimostrare che eventuali limitati cedimenti differenziali, siano tali da non modificare significativamente la sagoma dello sbarramento e comprovarne la funzionalità nel tempo.

1.6.4 Dighe in materiale sciolto esistenti

Per quanto riguarda la gestione e il controllo della sicurezza di sbarramenti in materiale sciolto, sia omogenei, sia disomogenei, vengono fornite le seguenti indicazioni:

- *Inclinazione dei paramenti*: deve risultare tale da garantire la stabilità globale e impedire il verificarsi di smottamenti locali; inoltre è necessario il mantenimento dell'inerbimento dei paramenti.
- *Larghezza del coronamento*:
 - classi 1E, 4E e 7E: larghezza ≥ 3 m;
 - altre classi: larghezza ≥ 2.5 m.
- *Franco*: la differenza fra la quota del coronamento e la quota di massimo invaso deve essere compresa tra i valori:
 - classe 9E: 0.3 m - 0.8 m;
 - classi 3E e 6E: 0.8 m - 1.2 m;
 - classi 2E, 5E e 8E: 1 m - 1.5 m;
 - classi 1E, 4E e 7E: non inferiore a 1.5 m.
 -

Per le dighe in materiali sciolti disomogenee, oltre alle indicazioni suddette, devono essere rispettate le seguenti condizioni:

- *Nucleo interno di tenuta*: deve essere realizzato in argilla;
- non sono ammessi taglioni interni e manti di tenuta esterni in calcestruzzo.

Verifiche essenziali

Verifiche di stabilità

Gli invasi in materiali sciolti dovranno esplicitamente soddisfare le verifiche di stabilità, garantendo in condizioni statiche un idoneo fattore di sicurezza $F_s \geq 1.3$.

La verifica andrà condotta:

- in regime stazionario con massimo invaso (condizioni drenate);
- in condizioni di rapido svasso (condizioni non drenate).

La stabilità dovrà essere assicurata lungo superfici di scivolamento interessanti sia il solo rilevato, sia l'insieme rilevato – terreno di fondazione.

Qualora l'invaso rientri in area sismica, le verifiche andranno condotte anche tenendo conto in forma pseudo statica delle azioni sismiche, assicurando $F_s \geq 1.2$. Ciò verrà fatto introducendo:

1. un'azione orizzontale parallela alla sezione maestra dell'invaso pari a $F_h = CW$, dove $C = (S-2)/100$ è il coefficiente di intensità sismica, $S (\geq 2)$ il grado di sismicità, W il peso specifico della struttura;
2. un'azione verticale di intensità $F_v = 0.5 CW$.

Verifiche di rottura locale

L'esclusione di fenomeni di sifonamento o di rottura localizzata per sovrappressioni idrauliche al piede dello sbarramento andrà comprovata mediante monitoraggio e/o verifiche teoriche.

Cedimenti

Dovrà essere dimostrato, attraverso monitoraggio o calcolo, che l'invaso non ha subito né subirà durante la sua utilizzazione cedimenti assoluti e differenziali tali da comprometterne sicurezza o funzionalità.

1.6.5 Traverse fluviali

Traverse nell'alveo principale

Dovranno essere eseguite le verifiche come indicato nel seguito:

- verifica della filtrazione con rete idrodinamica, seguendo quanto meno l'ipotesi semplificativa di Blight;
- verifica del risalto in platea per $Q(m^3/s)$ con $Tr = 5, 20, 50$ anni;
- verifica del rigurgito verso monte contenuto in alveo nel caso di blocco della paratoia unica o di metà delle paratoie per $Q(m^3/s)$ con $Tr = 50, 100, 200$ anni;
- verifica che il rapporto tra la componente verticale e orizzontale della risultante agente sulla traversa sia ≥ 2 .

Inoltre, le traverse fluviali in progetto ubicate nell'alveo principale del corso d'acqua dovranno presentare le seguenti caratteristiche:

- larghezza corrispondente a quella dell'alveo;
- paratoie di tipo a settore, proporzionate all'alveo in cui vengono inserite (preferibilmente non inferiori a 20 m), ad eccezione della paratoia callone;
- presenza di taglioni a monte e a valle.
- Tali indicazioni vengono suggerite anche nei casi in cui si vogliano apportare modifiche migliorative a traverse esistenti.

Opere di presa e/o di regolazione sul canale derivatore

Per questo tipo di opere, in fregio all'alveo principale del corso d'acqua, dovranno essere eseguite le verifiche come nel seguito indicato:

- verifica della filtrazione con rete idrodinamica, seguendo quanto meno l'ipotesi semplificativa di Blight;
- verifica del risalto in platea per portata $Q (m^3/s)$ con $Tr = 5, 20, 50$ anni;
- verifica che il rapporto tra la componente verticale e orizzontale della risultante agente sulla traversa sia ≥ 2 .

Dal momento che il canale derivatore presenterà dimensioni modeste rispetto all'alveo principale, le opere di presa e/o di regolazione in progetto, dovranno presentare le seguenti caratteristiche :

- larghezza corrispondente a quella dell'alveo derivatore;
- paratoia unica (di tipo a settore);
- taglioni a monte e a valle dell'opera.

Tali indicazioni vengono suggerite anche qualora si vogliano apportare modifiche migliorative a traverse esistenti; è opportuno in questi casi realizzare luci di presa totalmente parzializzabili, seguite da condotta di spurgo del trasporto solido.

Raccomandazioni

La parte superficiale delle platee e la parte inferiore delle pile lambite dalla corrente saranno rivestite da idoneo strato, realizzato con calcestruzzo fibrorinforzato o con cemento e calcestruzzo LAFARGE.

E' opportuno che le paratoie, specie quelle di ampia luce, vengano azionate mediante un sistema a martinetti e laser di puntamento.

E' opportuno che le pile siano disgiunte dalla struttura costituita da taglioni e platea.

Le arginature sufficienti a contenere il rigurgito provocato dalla traversa o specificatamente realizzate saranno verificate sia a "serbatoio pieno", sia a "serbatoio vuoto" e a "rapido svaso", per un tratto pari ad almeno metà dell'ampiezza idrostatica conseguente a una Q_{355} (Q_{355} = portata media giornaliera che si verifica per un numero di giorni l'anno uguale o superiore a 355).

1.6.6 Casse di espansione

Le casse di espansione vanno realizzate in modo da essere interessate da piene rilevanti e non da morbide o piene ordinarie.

Le eventuali bocche della cassa devono essere presidiate e governate in modo tale che la cassa possa raccogliere il picco di piena. Il picco o i picchi dell'onda di piena devono essere noti con congruo anticipo; è pertanto necessario conoscere in modo approfondito l'entità dell'evento di piena che può fluire a valle della cassa. Inoltre la conoscenza del trasporto solido è elemento fondamentale per il buon funzionamento della cassa.

Si dovrà garantire che l'effetto della cassa sulla riduzione del trasporto solido eviti che la presenza della stessa opera possa produrre effetti di scalzamento su manufatti (ponti, argini, opere irrigue) ubicati più a valle, a seguito dell'accumulo di trasporto solido nella cassa.

Poiché la cassa si può colmare rapidamente e si può svuotare altrettanto rapidamente, gli argini della cassa vanno protetti con idonei rinfianchi su entrambi i lati.

Per queste opere sono valide le indicazioni di coronamento e franco relative alle classi da 1N a 9N e le verifiche richieste per le classi da 1N a 8N.

1.7 Piano di monitoraggio

Le osservazioni sul comportamento di uno sbarramento sono di due tipi: DIRETTE e INDIRETTE.

Le osservazioni dirette devono riguardare:

- ispezione delle condizioni del paramento di valle e del paramento di monte per rilevare eventuali infiltrazioni o danneggiamenti;
- ispezioni attraverso eventuali tunnel presenti per la registrazione delle portate di filtrazione;
- individuazione dei fenomeni di instabilità e frane;
- osservazione e registrazione del livello d'invaso;
- mantenimento del libero deflusso.

Le osservazioni indirette riguardano le letture strumentali che possono essere effettuate da personale autorizzato stabilito nel piano di gestione dello sbarramento, oppure raccolte automaticamente mediante un calcolatore.

1.7.1 Strumentazione per il monitoraggio

La strumentazione **minima** che deve essere posizionata sugli sbarramenti, in sede di progetto, è la seguente:

CLASSI 7N, 8N e 9N:

- asta idrometrica per il controllo del livello dell'acqua e il mantenimento del franco.

CLASSI 6N:

- asta idrometrica per il controllo del livello dell'acqua e il mantenimento del franco;
- n. 1 piezometro tipo Casagrande o a tubo aperto per il controllo della linea di saturazione.

CLASSI 4N e 5N:

- asta idrometrica per il controllo del livello dell'acqua e il mantenimento del franco;
- n. 2 piezometri tipo Casagrande o a tubo aperto per il controllo della linea di saturazione;
- n. 4 picchetti posizionati in modo equidistante sul coronamento, al fine di verificare mediante teodolite e mira fissa il loro allineamento nel tempo.

CLASSE 3N:

- asta idrometrica per il controllo del livello dell'acqua e il mantenimento del franco;
- n. 4 piezometri tipo Casagrande o a tubo aperto per il controllo della linea di saturazione;
- stramazzo per la misura delle portate di filtrazione.

Inoltre, per gli sbarramenti in terra: n. 2 assestimetri a croce.

CLASSI 1N e 2N:

- asta idrometrica per il controllo del livello dell'acqua e il mantenimento del franco;
- n. 4 piezometri tipo Casagrande o a tubo aperto per il controllo della linea di saturazione.

Inoltre, per gli sbarramenti in terra:

- n. 2 assestimetri a croce;
- mira sul coronamento.

Per gli sbarramenti in calcestruzzo:

- mira sul coronamento;
- misura delle portate di filtrazione raccolte dalle canne e trasmesse ad uno stramazzo.

Per quanto riguarda la strumentazione **minima** da posizionare sugli sbarramenti esistenti, valgono le seguenti indicazioni:

CLASSI 7E, 8E e 9E:

- asta idrometrica per il controllo del livello dell'acqua e il mantenimento del franco.

CLASSI 6E:

- asta idrometrica per il controllo del livello dell'acqua e il mantenimento del franco;
- n. 1 piezometro tipo Casagrande o a tubo aperto per il controllo della linea di saturazione.

CLASSI 4E e 5E:

- asta idrometrica per il controllo del livello dell'acqua e il mantenimento del franco;
- n. 2 piezometri tipo Casagrande o a tubo aperto per il controllo della linea di saturazione.

CLASSE 3E:

- asta idrometrica per il controllo del livello dell'acqua e il mantenimento del franco;
- n. 4 piezometri tipo Casagrande o a tubo aperto per il controllo della linea di saturazione.

CLASSI 1E e 2E:

- asta idrometrica per il controllo del livello dell'acqua e il mantenimento del franco;
- n. 4 piezometri tipo Casagrande o a tubo aperto per il controllo della linea di saturazione.

Inoltre, per gli sbarramenti in terra: n. 2 assestimetri a croce.

Per gli sbarramenti in calcestruzzo: misura delle portate di filtrazione raccolte dalle canne e trasmesse ad uno stramazzo.

1.7.2 Posizionamento della strumentazione

Vengono di seguito specificate le più significative disposizioni per la strumentazione di monitoraggio.

- *Asta idrometrica*: deve essere posizionata in una zona dell'invaso che sia significativa per valutare l'altezza d'acqua e facilmente accessibile per le letture.
- *Piezometri*: disposizione a coppia sulla stessa sezione, uno a monte del nucleo di tenuta e uno a valle del nucleo di tenuta negli sbarramenti in terra.
- *Mira e teodolite*: predisposizione di una base per il supporto del puntatore posizionata in linea con l'asse del coronamento, ma non su di esso. Allo stesso modo va predisposta la mira fissa, dalla parte opposta rispetto al corpo diga.
- *Assestimetri*: vanno posizionati in coppia nella stessa sezione trasversale, uno a monte e uno a valle del nucleo di tenuta.

1.7.3 Piano di lettura della strumentazione e personale addetto

Il piano temporale di lettura della strumentazione dovrà essere strutturato secondo lo schema seguente.

	CL ASSI 1N, 2N e 3N	CLASSI 4N, 5N e 6N	CLASSI 7N, 8N e 9N
asta idrometrica	ogni 15 giorni	ogni 15 giorni	mensile
piezometri	mensile	bimensile	trimestrale
mire o teodolite	mensile	bimensile	trimestrale
assestimetri	mensile	bimensile	trimestrale
portate di filtrazione	lettura giornaliera (o automazione della lettura a galleggiante)	lettura giornaliera (o automazione della lettura a galleggiante)	lettura giornaliera (o automazione della lettura a galleggiante)

Durante eventi di piena o di precipitazioni particolarmente intense, il controllo della strumentazione dovrà essere di frequenza superiore alle indicazioni fornite nello schema precedente.

L'eventuale strumentazione prevista in aggiunta a quella suddetta dovrà essere inserita nel piano temporale di lettura.

Contemporaneamente alla redazione del piano temporale di lettura della strumentazione, è obbligatoria la nomina ufficiale del personale addetto alle letture strumentali, in modo da assicurare l'attendibilità e la coerenza delle letture.

Le letture effettuate devono essere elaborate in un grafico che consenta l'immediata visualizzazione delle eventuali anomalie, degli spostamenti dello sbarramento, dell'andamento della linea di saturazione e degli eventuali errori di lettura.

Piano di sostituzione della strumentazione

L'utilizzazione della strumentazione descritta, la sua sostituzione a seguito di deterioramento e la taratura della nuova strumentazione sostitutiva di quella deterioratasi, dovranno fare riferimento a un preciso capitolato di acquisto della strumentazione in oggetto, comprendente indicazioni sulle procedure descritte (utilizzo, sostituzione e taratura).

1.8 Piano di manutenzione

Per qualsiasi tipologia di sbarramento è necessaria la stesura di un piano temporale di manutenzione. A questo proposito si forniscono, le indicazioni dei tempi **minimi** entro cui vanno effettuati i controlli e le operazioni di manutenzione:

- Controllo del funzionamento degli scarichi: 6 mesi;
- Controllo dello stato e del funzionamento della strumentazione: 6 mesi;
- Taglio di erba e cespugli (non solo sullo sbarramento ma anche lungo i canali di presa e adduzione e in prossimità degli scarichi): almeno tre sfalci all'anno;
- Controllo del funzionamento delle canne di drenaggio per gli sbarramenti in muratura: 1 all'anno;
- Controllo dello stato di conservazione di camminamenti o passerelle: 1 all'anno;
- Pulizia delle griglie di eventuali bocche di presa: 1 all'anno;
- Controllo del funzionamento delle paratoie: 2 all'anno;
- Controllo dei paramenti delle dighe in calcestruzzo: 1 all'anno.



CAPITOLO 2

CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA E GEOTECNICA



2 Caratterizzazione Stratigrafica e Geotecnica

2.1 Indagini geognostiche

La relazione geotecnica va condotta sulla scorta di indagini condotte in tutta l'area dell'opera e con particolare attenzione nella zona di fondazione. Le indagini dovranno fornire un quadro comprendente:

- la descrizione stratigrafica del sito;
- la tipologia, la classificazione e la variabilità del terreno di ogni strato;
- la resistenza, la deformabilità e la permeabilità di ogni strato;
- la posizione del livello di falda (se presente) e i dettagli sulla sua natura (filtrazione, stima della portata di flusso attraverso i diversi strati).

L'estensione e la profondità d'indagine dovrà essere commisurata all'opera e ottemperare alle indicazioni fornite dal D.M. dei lavori pubblici 11 marzo 1988 (Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione).

Il programma e l'esecuzione delle indagini dovranno essere espletati sotto la responsabilità del professionista estensore della relazione geotecnica o geologica e i risultati costituire parte integrante della suddetta relazione. La definizione stratigrafica potrà essere effettuata a diverso grado di dettaglio mediante pozzetti esplorativi, sondaggi ad elica, sondaggi a percussione e sondaggi a rotazione.

2.1.1 Pozzetti esplorativi

Semplici pozzetti esplorativi possono costituire un primo mezzo di indagine. Spinti a profondità di circa $3 \div 4$ metri dal piano campagna, forniscono dati sulla stratigrafia di superficie. Per profondità superiori ai $4 \div 5$ metri occorre prevedere l'esecuzione di veri e propri sondaggi geotecnici, comunque indispensabili per l'installazione di strumentazione profonda.

Il numero di pozzetti esplorativi richiesti dipende dalle dimensioni del sito e dalla variabilità del terreno di fondazione. Per i siti più piccoli 3 pozzetti possono inizialmente essere sufficienti, se posizionati agli angoli dell'area del bacino. Pozzetti aggiuntivi verranno eseguiti al centro del bacino e lungo l'allineamento del rilevato, per confermare o indagare in modo più appropriato quanto acquisito.

Suggerimenti relativi alle modalità di esecuzione dei pozzetti sono riportate in Tabella 2.1. L'esecuzione dei pozzetti consente il prelievo di campioni rappresentativi e la definizione del livello di falda (Tabella 2.2 per una disamina dei metodi di campionamento). I campioni prelevati vengono sottoposti a prove di laboratorio la caratterizzazione geotecnica. La Tabella 2.3 definisce la classe qualitativa di campionamento per l'esecuzione di alcune prove di laboratorio.

Tabella 2.1. Schema per l'esecuzione di pozzetti esplorativi

Scavo e campionamento

- Scotico del manto erboso e suo accumulo in un luogo adatto
- Scotico del terreno di copertura e suo accumulo in luogo adatto (preferibilmente su teloni di plastica)
- Scavo del terreno e accumulo in luogo separato
- Osservazione e descrizione della stratigrafia del terreno
- Prelievo di campioni e fotografie

Riempimento dello scavo

- Riposizionamento del materiale nell'ordine inverso di scavo, evitando per quanto possibile il mescolamento del materiale scavato
- Messa in opera del terreno di riempimento in strati di 20÷40 cm e compattazione con la benna dell'escavatore (particolarmente importante per terreni coesivi)
- Riposizionamento del terreno di copertura e del manto erboso

N.B. Lo scavo deve essere riempito in modo abbondante, lasciando una superficie convessa, per i futuri cedimenti del terreno.

Tabella 2.2. Campionamento del terreno

a. Scavi (senza sostegno delle pareti)

Fino a circa 1.5 m di profondità, si prelevano manualmente campioni rappresentativi dal fondo scavo. Al di sotto di 1.5 m i campioni rappresentativi sono prelevati utilizzando la benna dell'escavatore.

b. Scavi (pareti provviste di sostegno)

Si prelevano campioni rappresentativi dalla base dello scavo.

c. Trivellazione a mano

Consente il prelievo del campione di terreno ad ogni estrazione dell'utensile. E' adatta ai soli terreni coesivi teneri.

d. Sondaggi

Consentono il prelievo di campioni indisturbati e rimaneggiati (utensile di perforazione). Sono necessari campioni indisturbati per eseguire prove meccaniche di laboratorio o per determinazioni dettagliate del profilo stratigrafico.

e. Frequenza di campionamento

Ad ogni cambio di strato o di consistenza e di 1 m là dove la tipologia del terreno rimane costante. I campioni devono essere messi in robuste sacche di plastica chiuse ed etichettate, con l'identificazione del prelievo e della profondità. I campioni per la definizione del contenuto d'acqua naturale devono essere chiusi in opportuni contenitori sigillati.

Tabella 2.3. Qualità di campionamento per le prove di laboratorio

Prova di laboratorio	Terreno	Classe di campionamento (Raccomandazioni AGI, 1977)
Limite liquido e plastico (solo per terreni prevalentemente argillosi o sabbiosi)	Argilla, limo, sabbia	Q ₂ o sup.
Curva granulometrica	Ghiaia, sabbia	Q ₂ o sup.
Prova di compattazione (Proctor)	Terre con d _{max} =5-20 mm	Q ₂ o sup.
Contenuto d'acqua	Tutti i terreni medi e fini	Q ₃ o sup.
Analisi chimiche	Tutti i terreni	-

2.1.2 Sondaggi con elica

Nei sondaggi con elica l'utensile di perforazione consiste in una vite senza fine che avanza per rotazione asportando con taglio continuo il terreno sull'intera sezione del foro. L'impiego di questo mezzo è limitato all'esecuzione di fori in terreni argillosi di media resistenza senza blocchi o strati cementati. Il materiale di perforazione viene posato in sequenza sul terreno e fotografato per ricostruirne la stratigrafia. Questo metodo di indagine non fornisce informazioni precise sull'andamento del livello di falda, pertanto la stima della quota piezometrica è approssimativa. La trivellazione può raggiungere profondità superiori ai 6 m, ma molto dipende dalle condizioni del terreno e dalla posizione della falda. Gli strumenti impiegati vanno dalla trivella azionata a mano, di $50 \div 150$ mm di diametro per i fori di alcuni metri di profondità, alle attrezzature meccaniche di $100 \div 300$ mm di diametro, con le quali è possibile raggiungere profondità anche di 40 m. I campioni prelevati sono fortemente disturbati e la delimitazione degli strati è imprecisa; tali svantaggi sono particolarmente evidenti in presenza d'acqua. In Figura 2.1 sono schematizzate diverse tipologie di utensili di perforazione.

2.1.3 Sondaggi a percussione

I sondaggi a percussione permettono di attraversare speditamente fino a notevoli profondità qualsiasi tipo di terreno. L'avanzamento del sondaggio avviene mediante infissione con maglio o caduta di utensili robusti (scalpello o curetta). Lo scalpello è indicato per l'attraversamento di strati lapidei, mentre la curetta è utilizzata particolarmente per terreni incoerenti a grana grossa.

Le limitazioni dei sondaggi a percussione risiedono nel tipo di tecnica adottato, comportante il dilavamento delle frazioni fini, nell'impossibilità di ricostruire nel dettaglio la successione stratigrafica e di ottenere campioni indisturbati.

2.1.4 Sondaggi a rotazione

I sondaggi a rotazione consentono il raggiungimento della profondità desiderata e sono adatti in qualsiasi tipo di terreno (terreni molto teneri, sciolti o saturi d'acqua, non investigabili con altre tecnologie). Questi sondaggi possono consentire l'estrazione di campioni indisturbati, particolarmente rappresentativi per l'esecuzione di prove di laboratorio a carattere meccanico od eventualmente idraulico. Inoltre numerose prove in sito possono essere realizzate dal foro eseguito. Svantaggi sono costituiti dal costo elevato e dalla necessità di poter disporre di adeguate vie di accesso all'area.

Tabella 2.4. Identificazione speditiva in sito e descrizione dei terreni coesivi e organici(British Standards Classification)

Tipologia	Dimensione [mm]	Identificazione visiva	Plasticità	Ulteriore tipologia di terreno a cui può legarsi	Consolidazione/Resistenza		Colore
Limo	0.06	Solo il limo grossolano è appena visibile a occhio nudo	Non plastico o di bassa plasticità	DIMENSIONE DEL SECONDO COSTITUENTE Terminologia % di sabbia o ghiaia Sabbioso Ghiaioso tra 35 e 65 % Argilloso meno del 35 %	Terminologia	Prova	Rossastro Rosa Giallastro Marrone Oliva Verdastro Bluastro Biancastro Grigio Nero
	(Grossolano)	Bassa plasticità			Soffice o sciolto	Facilmente modellabile o friabile fra le dita	
	0.02 (Medio)	Granulare al tatto Si scioglie in acqua			Compatto o denso	Può essere modellato o sbriciolato con forte pressione delle dita	
	0.006 (Fine) 0.002	Può sbriciolarsi facilmente tra le dita e divenire polvere se completamente asciutto					
Argilla	< 0.002	Pezzi di argilla completamente asciutti possono rompersi ma non polverizzarsi tra le dita L'argilla si disintegra lentamente in acqua Esibisce plasticità Secca lentamente Apprezzabile ritiro nell'asciugarsi, con rotture	Plasticità	Sabbioso Ghiaioso tra 35 e 65 % Limosa meno del 35%	Molto soffice	Trasuda tra le dita quando compressa	
					Soffice	Modellata con leggera pressione delle dita	
					Compatta	Può essere modellato con alta pressione delle dita	
					Rigida	Non può essere modellato con le dita ma segnato con il pollice	
Organico Torba					Molto rigida	Può essere segnato con l'unghia del pollice	
	Variabile	Contiene una grande quantità di materiale vegetale			Compatto		Nero
	Variabile	Composto prevalentemente da residui di piante Ha un odore caratteristico E' fibroso			Struttura spugnosa	Molto compressibile e aperto	Marrone scuro
					Plastica	Può essere modellato con le dita della mano	

Tabella 2.5. Identificazione speditiva in sito e descrizione di terreni non coesivi(British Standards Classification)

Identificazione visiva		Ulteriore tipologia di terreno a cui può legarsi		Consolidazione/Resistenza		Colore	
Blocchi Ciotoli	200	DIMENSIONE DEL SECONDO COSTITUENTE		Terminologia	Prova speditiva	Rossastro Rosa Giallastro Marrone Oliva Verdastro Bluastro Biancastro Grigio Nero	
		Terminologia	% di argilla o limo	Presenza di vuoti e grado di addensamento delle particelle			
Ghiaia	60	Leggermente argillosa	< 5	Sciolta	Può essere scavato con una vanga Si possono facilmente infiggere pali di legno di circa 50 cm		
		Argillosa limosa	5 ÷ 10	Densa			
Sabbia	(Grossa)	Facilmente visibile ad occhio nudo	Molto argillosa Molto limosa	15 ÷ 35	Leggermente cementata	Abrasività dei grani ed esame visivo	
	20	Forma delle particelle: angolare, subangolare, subrotonda rotonda, piatta, allungata	Ghiaia sabbiosa Sabbia ghiaiosa				
	(Media)						
	6	Ben graduata: ampio intervallo nella dimensione dei grani, ben distribuiti					
	(Fine)	Poco graduata: grani con dimensione uniforme					
	2	Visibile ad occhio nudo					
	(Grossa)	Sabbia friabile quando è asciutto, facile da disgregare					
0.6							
(Media)							
0.2	Fine						
(Fine)							
0.06							

2.1.5 Descrizione degli strati mediante osservazioni e prove in sito

La descrizione fisica preliminare dei terreni incontrati può essere effettuata in sito tramite semplici osservazioni visive e pratiche, come riportato nelle Tabelle 2.4 e 2.5. Gli ordini di grandezza di parametri fondamentali quali grado di addensamento, resistenza meccanica e permeabilità possono essere dedotti da prove in sito piuttosto semplici (si vedano le Tabelle 2.6, 2.7, 2.8). Al contrario, la definizione quantitativa delle proprietà del terreno di fondazione può essere ottenuta solo mediante il prelievo di campioni indisturbati e l'esecuzione di prove di laboratorio (si veda il paragrafo 2.1.7).

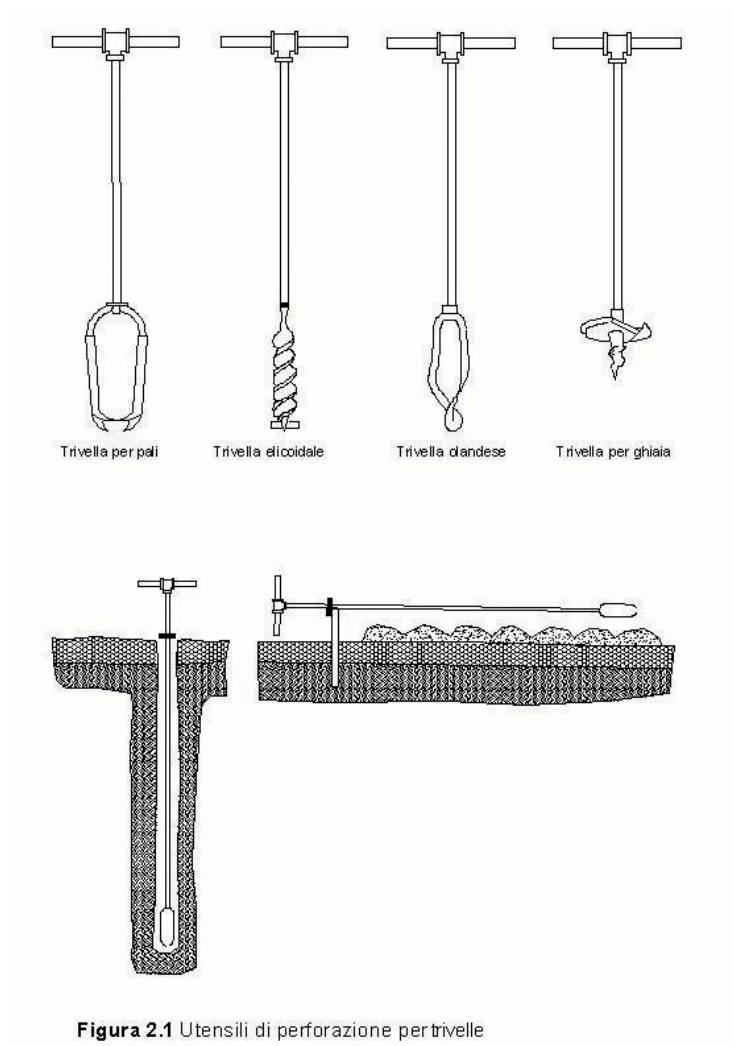


Figura 2.1 Utensili di perforazione per trivelle

Tabella 2.6. Stima della consistenza/resistenza del terreno attraverso prove speditive e osservazioni sul posto

Tipo di terreno	Terminologia	Prove	Comportamento dello scavo
TERRENO COESIVO			
Argilla	Molto tenera	Trasuda tra le dita quando compressa	Se lo scavo non è sostenuto, la parete rigonfia e crolla
	Tenera	Modellata con leggera pressione delle dita	
	Compatta	Modellata con forte pressione delle dita	Lo scavo non sostenuto rimane verticale e stabile
	Dura	Non può essere modellata fra le dita, può essere segnata con l'unghia del pollice	Lo scavo non sostenuto rimane verticale e stabile
	Molto dura	Non può essere segnata con l'unghia del pollice	
Limo	Tenero o sciolto	Facilmente modellabile o sbriciolabile fra le dita	Lo scavo non sostenuto rigonfia e crolla
	Duro o denso	Modellato o sbriciolabile con forte pressione delle dita	Lo scavo non sostenuto è adatto a rimanere verticale e stabile

Tipo di terreno	Terminologia	Prove	Comportamento dello scavo
TERRENO GRANULARE			
Sabbia, Ghiaia	Sciolta	Può essere scavato con una vanga. Si possono facilmente infiggere pali di legno di 50 cm	Se lo scavo non è sostenuto, crolla
	Densa	Un palo di 50 cm in legno fatica ad essere infisso	Lo scavo non sostenuto è adatto a rimanere verticale, a meno che non sia presente un alto contenuto di argilla e limo
	Leggermente cementata	Esame visivo: disgregazione del terreno in grani, che sono molto abrasivi	
Blocchi, Ciottoli	Sciolti Densi	Esame visivo	
Organico	Compatto		Variabile, ma ad alto rischio di collasso
Torba	Struttura spugnosa	Molto compressibile, con struttura del solido aperta	
	Plastica	Può essere modellato con le dita della mano	

NOTA: Per pozzetti esplorativi in terreni sopra il livello di falda. I terreni granulari sotto la falda generalmente collassano immediatamente durante lo scavo.

Tabella 2.7. Permeabilità del terreno

Tipo di terreno	Permeabilità approssimativa [m/s]	Caratteristiche di permeabilità/drenaggio
Argilla	$< 10^{-8}$	praticamente impermeabile
Limo	$10^{-8} \div 10^{-6}$	bassa permeabilità drenaggio difficile
Sabbia	$10^{-6} \div 10^{-3}$	permeabilità media/alta drenaggio moderatamente libero
Ghiaia/ciottoli	$> \text{di } 10^{-3}$	alta permeabilità, drenaggio libero
Organico/torba	variabile	variabile

2.1.6 Valutazione della permeabilità

La valutazione delle caratteristiche di permeabilità di un terreno senza l'esecuzione di prove adeguate può essere affidata con successo solo ad ingegneri geotecnici o geologi di provata esperienza. La valutazione definitiva della permeabilità va basata sia su prove svolte in sito sul terreno di fondazione che su campioni provati in laboratorio. La Tabella 2.7 riporta intervalli di permeabilità indicativi per diverse tipologie di terreno, la Tabella 2.8 fornisce indicazioni per la misura speditiva in sito.

2.1.7 Prove di laboratorio

Le indagini in sito sopra descritte consentono solo la collezione di informazioni di minimo, riferite soprattutto alla definizione stratigrafica e alla determinazione di un intervallo di massima delle proprietà meccaniche.

La classificazione completa dei terreni naturali e dei terreni utilizzati nella costruzione dello sbarramento può essere condotta solo sulla base di prove di laboratorio eseguite su un numero rappresentativo di campioni. Le prove di laboratorio fondamentali sono:

- Terreni coesivi
 - determinazione del contenuto d'acqua naturale w_n ;
 - limite liquido w_L ;
 - limite plastico w_p ;
 - curva granulometrica;
 - relazione fra densità/contenuto d'acqua;
 - determinazione della resistenza meccanica (prove triassiali e di taglio, valori di c' e di ϕ');
 - determinazione della deformabilità (prove edometriche e triassiali);
 - determinazione della permeabilità (prove con permeametro ed edometriche).
- Terreni granulari
 - determinazione del contenuto d'acqua naturale w_n ;
 - curva granulometrica;
 - determinazione di resistenza meccanica e deformabilità su campioni ricostituiti (ϕ' e ϕ'_{cv}).
- Campioni di terreno e acqua
- Rocce
 - analisi chimiche;
 - grado di fatturazione;
 - -determinazione della resistenza meccanica e della deformabilità (prove di taglio, point load test, prova brasiliana).

Va sottolineato come la permeabilità sia strettamente dipendente dalla struttura del terreno. Tale aspetto risulta particolarmente condizionante qualora si operi in argille consistenti o rocce fratturate, caratterizzate da una permeabilità macrostrutturale (misurabile in laboratorio) e da una permeabilità megastrutturale (variabile in funzione di disposizione, apertura e rugosità delle fratture dell'ammasso). In questi casi si raccomanda di non limitare la caratterizzazione a sole prove di laboratorio, ricorrendo a prove di permeabilità in sito tali da coinvolgere volumi di materiale rappresentativi per il problema in esame.

Tabella 2.8. Stima della permeabilità in sito per mezzo di una prova di filtrazione in foro di sondaggio

Metodologia

- Dotazione di un tubo lungo approssimativamente 500 mm, con diametro di 150 mm ed argilla soffice per sigillare la tubazione ove richiesto. Il tubo verrà utilizzato tenendo presente la successione seguente:

1. scavo di un foro di profondità richiesta;
2. inserimento del tubo nel foro in posizione verticale e sigillo del fondo compattandolo con argilla per prevenire la risalita d'acqua;
3. riempimento con acqua fino alla cima del tubo;
4. con una perdita di carico lenta, si misura il tempo relativo ad un abbassamento di 50 mm e si calcola la portata media con l'uso della relazione :
area del tubo * perdita di carico/tempo
5. con una perdita di carico rapida, si procede aggiungendo acqua per mantenerne il livello appena al di sotto del colmo del tubo. Il valore medio della portata può essere calcolato cronometrando il riempimento di un contenitore di volume noto ("packers test");
6. stima della permeabilità k con l'espressione:

$$k = Q/(F H) \text{ [m/s]}$$

dove

Q = portata media [m³/s]
 r = raggio del tubo [m]
 H = lunghezza del tubo (o carico costante applicato) [m]
 $F = 2.75 D = 2.75 \cdot 2 \cdot r$ = coefficiente di immissione

7. ripetizione per 3 volte della prova e calcolo del valore medio;
8. confronto del risultato della prova con altri siti indagati.

Qualora la stratigrafia non fosse omogenea occorrono almeno 3 prove per strato. La media dei valori ottenuti fornirà una stima rappresentativa della permeabilità.

Note

- Ad una perdita di carico rapida corrisponde solitamente una elevata permeabilità, indice che il materiale predominante è granulare. Tuttavia una perdita abbondante può verificarsi anche in terreni coesivi essiccati o fessurati per flusso attraverso le fratture.
- Ad una perdita molto lenta corrisponde un materiale predominante coesivo.

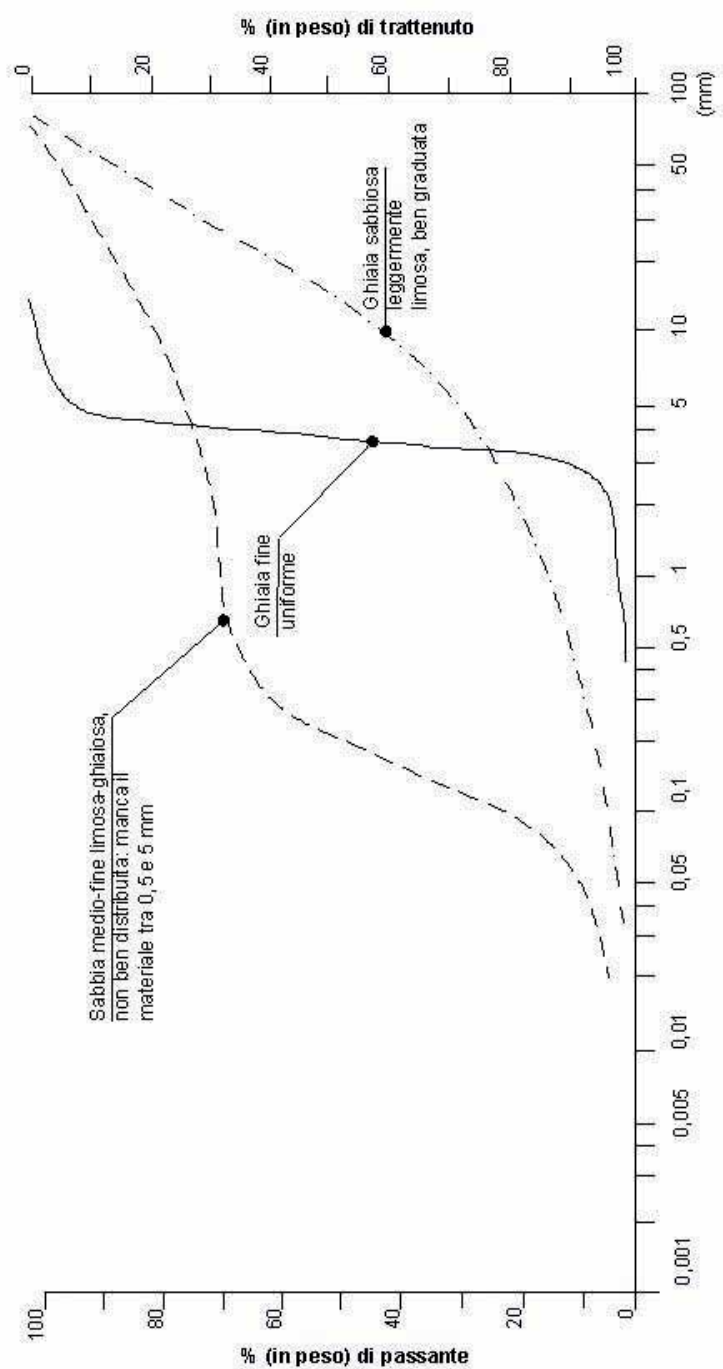


Figura 2.2 Curva granulometrica - terreno granulare

2.2 Valutazioni conclusive

I dati raccolti attraverso lo studio preliminare e la ricognizione in sito vanno integrati con i risultati delle indagini per valutare in modo completo le condizioni del terreno nell'ambito dell'area indagata.

Dovrà essere possibile la ricostruzione stratigrafica di una sezione diretta secondo l'allineamento del rilevato e di una ad esso trasversale. Per siti maggiormente complessi (ad esempio laddove sia richiesta la costruzione di più rilevati arginali o per bacini non in alveo limitati da un rilevato chiuso) potrebbero essere necessari profili stratigrafici aggiuntivi.

L'area scelta per il prelievo del materiale per la costruzione dello sbarramento va individuata con un numero sufficiente di sezioni, che dovrebbero consentire di ottenere un quadro della variazione del terreno con l'indicazione delle proprietà di ogni strato individuato.

La Tabella 2.9 riassume le proprietà delle principali tipologie di terreno, con riferimento alle loro qualità per fungere da fondazione, nonché da materiale per costruire uno sbarramento. In generale, i siti che comprendono uno strato di terreno coesivo ad una profondità prossima al piano campagna, sono ideali per la costruzione di bacini di raccolta delle acque. Terreni con elevata permeabilità sono più problematici e richiedono l'esecuzione di lavori di impermeabilizzazione che potrebbero risultare onerosi.

Tabella 2.9. Aspetti da considerare in relazione ai tipi di terreno

Terreno	Principali Peculiarità	Aspetti Critici
Ghiaia	In fondazione: resistente e poco compressibile, è adatta a sostenere uno sbarramento. Occorre mettere in opera uno strato di miscela di sabbia e argilla, per formare una zona stabile e impermeabile. Può essere utilizzata nel drenaggio e nella protezione del pendio e della sommità del rilevato.	Favorisce la filtrazione da fondo invaso, con rischio di erosione del materiale fine e collasso del rilevato. Provvedimenti: scavo e riporto di materiale a bassa permeabilità se lo strato è superficiale, oppure consulenza di esperti se lo spessore è maggiore di 3 o 4 m.
Sabbia	Caratteristiche meccaniche solitamente sufficienti a sopportare il rilevato, a meno che sia rimaneggiata o sciolta. L'aggiunta di argilla ne fa un materiale adatto all'appoggio delle spalle del rilevato.	Favorisce la filtrazione al di sotto della diga e dal fondo dell'invaso, come la ghiaia, ma la portata può essere modesta. Può venire erosa sotto l'azione dell'acqua, così da rendere necessarie misure di protezione.
Limo		Risulta instabile se inumidito, perdendo coesione e struttura. Dà problemi di cedimenti/stabilità ed è facilmente erodibile. Pertanto è sconsigliato come materiale di fondazione o costruzione.
Argilla da molto tenera a tenera	Grazie alla bassa permeabilità risulta ottimale per il fondo del bacino. Adatta alla costituzione del nucleo impermeabile in sbarramenti disomogenei.	Altamente comprimibile e con bassa resistenza al taglio, ha caratteristiche meccaniche insufficienti per la fondazione. Può essere instabile nelle zone attorno al perimetro d'invaso. Spesso il contenuto d'acqua è troppo elevato per impiegarla nella costruzione. E' necessaria particolare cura nella selezione e posa in opera. A causa dell'alta plasticità va esclusa dalla zona delle spalle dello sbarramento per evitare rotture nella stagione secca.
Basamento roccioso affiorante	Non sussistono problemi di capacità portante o di cedimenti.	Se alterato o fessurato occorre valutare con attenzione le problematiche connesse al regime di filtrazione.

Terreno	Principali Peculiarità	Aspetti Critici
Argilla da compatta a dura	Grazie alla bassa permeabilità risulta ottimale per il fondo del bacino. Resistenza sufficiente a sostenere un rilevato: problematica solo nel caso di presenza di paleofrane le quali potrebbero indurre movimenti improvvisi durante la costruzione, o per la risalita del livello di invaso. Se non fessurata costituisce una fondazione poco permeabile, altrimenti si suggerisce la sigillatura superficiale mediante argilla soffice	Può rigonfiare se saturata dal bacino. Tuttavia questo aspetto può risultare poco significativo. Può essere necessario rimescolarla e innaffiarla o selezionarla attentamente qualora utilizzata per la costruzione del nucleo della diga. La plasticità medio-alta ne consiglia l'esclusione dalla zona delle spalle per evitare fessure durante le stagioni secche.
Argilla-torba organica	Possibile utilizzo nella rifinitura dei pendii o come suolo di superficie.	Inadatta a fungere da materiale di fondazione e di costruzione perché altamente comprimibile e con bassa resistenza al taglio.
Terreno rimaneggiato	Possibile utilizzo come riempimento se sufficientemente indagato e mantenuto sotto controllo, quasi mai economico.	Inadeguato meccanicamente e idraulicamente per la fondazione del rilevato. Possibilità di contaminazione con l'acqua del bacino.

2.3 Ulteriori raccomandazioni per il materiale costituente il rilevato

La scelta dei materiali impiegati nella costruzione di sbarramenti è dettata da requisiti meccanici, idraulici e di economicità. Con riferimento al materiale compattato nel rilevato, andranno considerate:

- resistenza meccanica;
- permeabilità ottenibile;
- quantità disponibile;
- facilità di scavo, trasporto e posa in opera;
- distanza dal luogo di costruzione della diga.

L'individuazione di materiale proveniente da cave prossime all'opera porterà a minimizzare il costo del trasporto. Materiali escavati ma non soddisfacenti i requisiti meccanici o idraulici possono essere utilizzati per realizzare opere minori o sistemazioni accessorie, come l'addolcimento dei pendii, la protezione di opere secondarie e di drenaggi.

Qualora materiali di qualità più pregiata siano reperibili a distanze tali da incrementare in maniera sensibile i costi di trasporto, si può scegliere di utilizzare materiali più scarsi, ma migliorati con tecniche opportune.

E' sconsigliato l'utilizzo di terreni individuati come inadatti in Tabella 2.9, a meno di progetti di intervento e controlli nel corso d'opera svolti da esperti del settore.

Nella realizzazione di sbarramenti omogenei è consigliato l'utilizzo di terreni con un contenuto di argilla compreso tra il 20% e il 30% che assicura una buona tenuta idraulica e una stabilità adeguata. Soluzioni diverse potrebbero essere comunque giustificate da uno specialista, sulla base di osservazioni più accurate dovute ad analisi di laboratorio approfondite (specialmente con rispetto alle caratteristiche di resistenza meccanica).

Anche in sbarramenti disomogenei il nucleo di tenuta dovrebbe preferibilmente essere costituito da materiali aventi una percentuale di argilla compresa fra il 20% e il 30%, essendo le altre zone costituite da sabbia e ghiaia ben graduate.

Terreni aventi un contenuto di argilla molto inferiore al 20% sono soggetti a moderate perdite d'acqua: il loro utilizzo potrebbe richiedere una copertura impermeabile. All'opposto terreni con un contenuto di argilla superiore al 30% sono soggetti a diminuzione di volume e quindi a fessurazioni nella stagione secca. Sono terreni che possono essere ancora congruamente impiegati nella parte di nucleo dello sbarramento, mentre è sconsigliato l'utilizzo per le parti esterne di rilevato.

Terreni aventi un limite liquido superiore al 90% o un indice di plasticità superiore al 65% vanno assolutamente esclusi dall'utilizzo come materiale per la costruzione del rilevato.



CAPITOLO 3

ASPETTI PROGETTUALI



3 ASPETTI PROGETTUALI

3.1 Contenuti della Relazione Geotecnica

La relazione geotecnica potrà essere suddivisa in tre parti:

1. Caratterizzazione del sito e dei materiali utilizzati nella realizzazione dell'invaso. In questa parte, sulla base delle indagini geognostiche e delle prescrizioni per i materiali da costruzioni, si definirà la stratigrafia originaria del sito, indagata con maggior dettaglio nell'area di imposta dell'opera, nonché le proprietà meccaniche e idrauliche delle formazioni geologiche e dei materiali da costruzione. Il dettaglio con cui verrà eseguita la caratterizzazione stratigrafica e geomeccanica andrà commisurato a classe e fattore di rischio dell'opera.
2. Verifiche progettuali. A partire dalla geometria e delle proprietà meccaniche definite nella prima parte della relazione, andranno condotte le seguenti verifiche:
 - condizioni di stabilità dei versanti naturali prospicienti l'invaso, anche a fronte delle mutate condizioni di regime delle acque;
 - calcolo della capacità portante e dei cedimenti indotti dall'opera;
 - verifiche delle problematiche correlate al regime di filtrazione indotto dall'opera (fenomeni di erosione e di sifonamento);
3. Descrizione delle fasi di realizzazione e raccomandazioni esecutive. Dovranno essere fornite nel dettaglio indicazioni a cui attenersi per la costruzione e la sistemazione dell'invaso.

3.2 Bacino d'Invaso

3.2.1 Generalità

La fase progettuale inizia con la ponderata considerazione di tutte le funzioni a cui l'invaso dovrà assolvere durante la sua vita tecnica e delle operazioni costruttive necessarie. Andranno contemplati tutti gli aspetti relativi alla realizzazione degli scavi all'interno dell'area di invaso, la determinazione dell'inclinazione delle sponde perimetrali, la costruzione o sistemazione delle vie di accesso al sito, degli eventuali isolotti, la definizione delle variazioni di profondità del bacino e la scelta delle specie vegetali e loro sistemazione (a lungo termine). Qualora il territorio interessato dalla realizzazione del bacino fosse attraversato da sottoservizi, servizi superficiali, percorsi di accesso, vie di comunicazione o altre infrastrutture interferenti con l'opera in progetto, si dovrà considerare la possibilità che questi vengano deviati o ricollocati in altro sito.

I principali criteri da rispettare nella progettazione di uno sbarramento in materiali sciolti sono i seguenti:

- sicurezza nei confronti della tracimazione che si può verificare nel corso di eventi di piena, da garantirsi mediante scarichi e dispositivi di troppo pieno adeguatamente dimensionati al fine di garantire un adeguato franco;
- stabilità del rilevato in tutte le condizioni operative dell'invaso (condizioni di invaso vuoto, di invaso al massimo del riempimento, di rapido svasso). Nelle verifiche in condizioni di rapido svasso occorre considerare la presenza delle sovrappressioni idrauliche agenti sul corpo del rilevato e sulla fondazione;
- sollecitazioni sul terreno di fondazione compatibili con la capacità portante del medesimo;
- controllo sul processo di filtrazione attraverso il corpo diga, fondazione e fianchi del rilevato così da impedire l'erosione interna (piping) e i processi di deterioramento delle pendici del rilevato. In particolare, le verifiche idrauliche dovranno garantire un elevato fattore di sicurezza nei confronti del sifonamento, in quanto nel caso di sbarramenti in terra tale fenomeno può portare a rovinosa e improvvisa rottura dell'opera. Nell'approntare la verifica a sifonamento, occorrerà accertarsi che la massima componente verticale in direzione basso – alto del gradiente idraulico sia significativamente inferiore al gradiente critico caratteristico del terreno attraversato dal moto di filtrazione;
- protezione della superficie di monte del rilevato dall'azione dell'acqua,
- realizzazione di paramenti di valle e parti sommitali dello sbarramento resistenti all'azione degli agenti atmosferici.

Le verifiche andranno condotte tenendo presente le imposizioni di legge per le verifiche geotecniche (D.M. dei lavori pubblici 11 marzo 1988) e in ottemperanza alla vigente normativa sismica (Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 3274 del 20 Marzo 2003). Tutte le opere costituenti l'invaso e in particolare il rilevato di sbarramento, devono essere progettate da tecnici del settore sulla base di criteri di progetto e di esecuzione ben consolidati.

3.2.2 Stabilità dei pendii

I pendii preesistenti situati in prossimità del bacino devono risultare stabili anche in presenza dell'opera in progetto. L'innalzamento di falda dovuto alla presenza di acqua nell'invaso può comportare un peggioramento per le condizioni di stabilità dei medesimi, pertanto le verifiche andranno condotte imponendo il regime idraulico più gravoso tra quelli possibili.

Il metodo di calcolo per le verifiche di stabilità andrà scelto in maniera tale da prendere in considerazione le potenziali superfici di scorrimento che per forma e dimensione si ritenga che maggiormente compromettano l'equilibrio. Si dovrà tenere conto di eventuali superfici di scivolamento preferenziali legate all'assetto geologico (discontinuità, variazioni litostratigrafiche, faglie, zone di taglio, etc.) del sito, o in assenza di queste le verifiche andranno condotte considerando un numero sufficiente di superfici cinematicamente possibili, evidenziando quella che comporta il fattore di sicurezza inferiore.

Il valore del coefficiente di sicurezza andrà assunto dal progettista e giustificato sulla base del metodo di calcolo adottato, del grado di conoscenza geomeccanica del sito e della situazione antropica e geologica e comunque nel rispetto del D.M. dei lavori pubblici 11 marzo 1988.

Qualora l'invaso comporti un innalzamento di falda con conseguenze negative per la stabilità andranno presi in considerazione provvedimenti appropriati, come la realizzazione di un sistema di drenaggio.

3.2.3 Erosione

L'azione del ripetuto innalzamento e abbassamento del livello dell'acqua nell'invaso e delle eventuali onde può comportare l'erosione di materiale dal paramento interno e dalle sponde dell'invaso. La prevenzione dallo sviluppo dell'erosione lungo le aree spondali dell'invaso è generalmente assolta dall'introduzione di specie vegetali. Possono tuttavia sussistere condizioni particolari per cui alcune aree richiedano maggiore protezione, in particolare per:

- i canali di scarico e di adduzione e le condotte in genere: questi manufatti vanno normalmente protetti mediante materiali quali c.a. o massi di rivestimento;
- le aree lungo i dispositivi di drenaggio o lungo i corsi d'acqua che scorrono in prossimità dell'invaso.

I canali di scarico e di adduzione e le condotte vengono solitamente protetti dall'introduzione di difese quali massi, miscele di calce e simili. Forme protettive aggiuntive possono essere costituite da palancolate, scogliere o massicciate posizionate vicino al livello massimo di invaso nel bacino. Si veda la tabella 3.2 per una valutazione dei vari tipi di protezione dall'erosione.

3.2.4 Isole

La realizzazione di eventuali isolotti può avvenire con il materiale non adatto alla costruzione dello sbarramento o con quello avanzato dalla costruzione. Gli isolotti dovranno avere sponde con inclinazioni di $\frac{1}{4}$ o inferiori.

3.2.5 Sedimentazione

Il trasporto solido degli immissari del bacino può comportare fenomeni di sedimentazione tali da ridurre anche significativamente il volume d'invaso disponibile. Per limitarne gli effetti vanno previste misure protettive idrauliche all'ingresso del bacino.

3.3 Progettazione del Rilevato in Terra

3.3.1 Generalità

La progettazione deve ottimizzare funzionalità, sicurezza ed economicità: i costi da minimizzare riguardano sia la realizzazione che la manutenzione durante la vita tecnica dell'invaso. Le caratteristiche geologico - geotecniche del sito interessato e del materiale da costruzione reperibile nelle vicinanze vanno considerate con attenzione.

Nel caso di scarsa documentazione delle proprietà geomeccaniche dei materiali adibiti alla costruzione di rilevati per invasi di categoria A, è possibile sopperire alla blanda caratterizzazione mediante il sovradimensionamento della struttura di sbarramento. A tale proposito i rilevati potranno avere una pendenza di monte compresa tra 1:2 e 1:4. Per quanto concerne il paramento di valle una pendenza accettabile è di 1:2, associata ad una zona molto permeabile che possa efficacemente abbattere la pressione interstiziale instaurata nel corpo diga per via della filtrazione attraverso il rilevato. Per ridurre drasticamente le perdite per filtrazione attraverso il corpo diga si può predisporre un setto semi-impermeabile che si estende dalla sommità del rilevato fino alla fondazione, eventualmente esteso al di sotto del piano campagna in presenza di terreni molto permeabili.

Il paramento di monte della diga va protetto dall'azione dell'acqua, ad esempio mediante una mantellata di elementi lapidei giustapposti. La parte sommitale e il paramento di valle vanno rifiniti in modo da resistere all'azione degli agenti atmosferici (erosione e deterioramento). Il tipo di protezione varia a seconda dei climi e della scelta sul tipo di manutenzione previsto per l'opera: ove possibile è consigliata l'introduzione di specie vegetali erbacee adatte allo scopo.

Una buona progettazione non si conclude con il dimensionamento dell'opera e la redazione dei disegni esecutivi, ma prosegue con le integrazioni permesse dalla più approfondita conoscenza del sito conseguita durante la fase costruttiva. Le indicazioni riportate nel seguito sono improntate a considerare un approccio generalmente prudentiale delle problematiche che si riscontrano, in modo da minimizzare le varianti in corso d'opera. Ciò non toglie la necessità durante la fase costruttiva di svolgere regolarmente un'attività di controllo.

3.3.2 Requisiti progettuali

I principali requisiti progettuali da considerare sono la sicurezza (e quindi la stabilità) e la tenuta idraulica.

La stabilità di un rilevato è generalmente assicurata quando:

- il terreno di fondazione ha buone caratteristiche meccaniche;
- il terreno impiegato per il rilevato è facilmente compattabile;
- sia assicurata la presenza di drenaggi per il controllo della filtrazione;
- l'altezza dello sbarramento, misurata dalla sommità al livello di imposta in fondazione, sia inferiore a circa 5 m;
- il parametro di monte abbia inclinazione $\leq 1:3$;
- il parametro di valle abbia inclinazione $\leq 1:3$.

Le misure indicate sono il presupposto per una struttura sicura in assenza di caratteristiche avverse. Buone caratteristiche meccaniche avallate da verifiche di stabilità consentono l'adozione di inclinazioni del paramento maggiori.

Per quanto riguarda i riferimenti per eseguire le verifiche di stabilità di sbarramenti in materiali sciolti si rimanda ai par. 1.6.3 e 1.6.4.

Sono da considerarsi inadatti per le fondazioni, come per la costruzione del rilevato, i seguenti terreni:

- suolo di superficie, incluso anche l'immediato sottosuolo;
- terreno ricco di torba o altamente organico, inclusi i ceppi d'albero;
- terreno molto umido;
- terreno soffice o molto soffice prelevato dalle aree di prestito;
- terreni con limite liquido superiore al 90% o con indice di plasticità superiore al 65%;
- terreno congelato;
- detrito di carbon fossile o materiale combustibile;
- terreno con proprietà chimiche o fisiche pericolose.

Per quanto riguarda la tenuta idraulica va ricordato che a rigore non esistono materiali totalmente impermeabili. Una buona barriera impermeabile può essere costituita da un terreno con una permeabilità inferiore a 10^{-9} m/s organizzato con spessore superiore ai 500 mm. Alcune metodologie atte ad assicurare al terreno in opera la permeabilità richiesta sono riportate nel capitolo relativo agli aspetti costruttivi. Alternative all'uso del terreno derivano dall'introduzione di materiali diversi, organizzati in barriere il cui spessore è funzione delle caratteristiche del materiale.

Le principali tipologie di sbarramento praticabili per la realizzazione di piccoli sbarramenti in materiale sciolto sono quattro: l'opportunità di realizzarne una piuttosto che l'altra dipende dal tipo di terreno disponibile per la costruzione e la fondazione. Le tipologie sono:

- **Sbarramenti a sezione omogenea**
 - **tipologia non rivestita:** interamente costituita da terreno sostanzialmente impermeabile
 - **tipologia rivestita:** costituita da terreno permeabile dotato di una copertura impermeabile sul paramento di monte e sul fondo dell'invaso
- **Sbarramenti a sezione disomogenea**
 - **tipologia zonata:** costituita da un nucleo di terreno impermeabile e da terreno più permeabile posto esternamente, per assicurare la stabilità d'insieme
 - **tipologia con diaframma:** costituita da un terreno permeabile dotato di setto o diaframma impermeabile

Nella prima tipologia l'intera sezione concorre in modo analogo a stabilità e tenuta idraulica. La seconda tipologia prevede la messa in opera di terreno anche altamente permeabile (miscela di sabbia e ghiaia) poiché la tenuta idraulica è assicurata interamente dal manto impermeabile. Nella terza e quarta tipologia il nucleo concorre in modo preponderante alla tenuta idraulica e in modo secondario alla stabilità, mentre vale il contrario per gli strati più esterni.

3.3.3 Sezione omogenea non rivestita

E' il tipo di sezione preferibile per altezze di sbarramento modeste qualora vi sia sufficiente disponibilità di terreno adeguato (ben assortito e con un contenuto di argilla variabile dal 20% al 30%). Contenuti di argilla maggiori possono comportare un eccessivo ritiro del materiale nonché problemi di stabilità e di manutenzione, a meno che non vengano impiegati in paramenti a inclinazione più dolce. Con altezze di sbarramento superiori ai 3 m la tipologia zonata può offrire maggiori vantaggi sia in costruzione che in gestione.

Le tipologie a sezione omogenea comportano un alto livello di filtrazione attraverso il rilevato, che alla base del paramento di valle può tradursi in elevate velocità. Pertanto può essere opportuno prevedere accorgimenti anti – erosione, come l'introduzione di un dreno al piede.

Le sezioni tipo sono schematizzate nella Figura 3.1. Nella Figura 3.1a il rilevato è posto direttamente su un terreno di fondazione impermeabile: questa è la forma di costruzione più semplice

ed economica. La Figura 3.1b mostra come un taglione, costituito da una trincea poi ricoperta di materiale impermeabile, possa essere utilizzato per prevenire la filtrazione là dove più di tre metri di terreno permeabile sovrastano lo strato impermeabile. Questo provvedimento consente di evitare una eccessiva profondità e difficoltà nell'eseguire lo scavo. Nella progettazione di un taglione occorre prestare attenzione alle conseguenze che si avrebbero qualora, per sismi o altri fenomeni, si creasse uno scollamento tra rilevato e taglione. Si potrebbero così creare percorsi preferenziali di flusso pericolosi perché erosivi. E' perciò raccomandabile realizzare taglioni in cui il gradiente tra monte e valle (ossia tra A e B in Figura 3.1) sia inferiore a 4. Per potenze dello strato permeabile inferiori al metro è preferibile approfondire l'appoggio del manufatto sul terreno impermeabile per tutta l'ampiezza del rilevato.

3.3.4 Sezione omogenea rivestita

Qualora il rilevato di sbarramento poggi su uno strato di terreno eccessivamente permeabile e con potenza superiore ai 4 m, può essere opportuno ricorrere all'installazione di un rivestimento impermeabile che ricopra il paramento di monte del rilevato e una parte del fondo dell'invaso (Figura 3.2). Tale soluzione non ha alternative qualora non sia utilizzato per il progetto personale specializzato in grado di studiare soluzioni diverse e meno costose. Il rivestimento del rilevato può essere realizzato utilizzando geomembrane, argilla o materiali bentonitici (questi particolari esecutivi verranno trattati in dettaglio nel paragrafo 3.3.9). La sezione con rivestimento richiede maggiori lavori di manutenzione rispetto alle altre, ed è una soluzione maggiormente onerosa, soprattutto nel caso in cui fossero necessari dei lavori di riparazione in periodi successivi alla costruzione.

3.3.5 Sezione zonata

La sezione zonata può essere prevista quando nelle vicinanze dell'opera sia disponibile una sufficiente varietà di terreni. Il terreno impermeabile viene impiegato per formare la barriera alla filtrazione (nucleo) nella parte interna del rilevato, a sua volta completato esternamente con la posa di materiale più grossolano permeabile ma stabile. Il nucleo deve essere il più ampio possibile per offrire una adeguata barriera alla filtrazione.

La zona di transizione tra il nucleo impermeabile e le aree esterne più permeabili comporta qualche criticità. E' importante che possibili movimenti relativi tra le diverse zone (dovuti per esempio a cedimenti differenziali, sismi o elevata erosione) non creino percorsi preferenziali per l'acqua che potrebbe generare pericolosi sifonamenti. Per scongiurare eventi di questo tipo è conveniente prevedere uno spessore di transizione tra le zone a differente permeabilità. Lo spessore sarà costituito da un filtro in terreno in grado di offrire il libero drenaggio dell'acqua ma anche

di deformarsi liberamente così da colmare gli eventuali scollamenti generati tra gli strati. La granulometria dei filtri deve inoltre permettere il trasporto di particelle solide verso il filtro per scongiurare l'erosione nel nucleo: è consigliabile l'impiego di sabbia pulita.

Tipologie tipiche delle sezioni a zona sono riportate in Figura 3.3.

3.3.6 Sezione a diaframma

Qualora la quantità di argilla disponibile non sia sufficiente a garantire un nucleo adeguatamente impermeabile è possibile far ricorso a una soluzione analoga dove tale funzione è assolta da un diaframma centrale di altro materiale impermeabile. I diaframmi vengono normalmente installati dalla sommità del rilevato omogeneo quando questo è stato completato per mezzo di una speciale attrezzatura, creando una zona di cemento bentonitico o argilla bentonitica. E' una procedura abbastanza costosa e solitamente poco conveniente per piccoli invasi; va tuttavia notato come recenti tecnologie consentano l'installazione di diaframmi corti (< 5 m) in cemento bentonitico. Vista la competenza richiesta per la corretta esecuzione di questo tipo di procedimento si raccomanda di prenderlo in considerazione solo quando l'impresa costruttrice sia fortemente specializzata in campo geotecnico.

Una sezione tipica di diga con diaframma di ritenuta è mostrata in Figura 3.4.

3.3.7 Considerazioni progettuali relative alla fondazione del rilevato

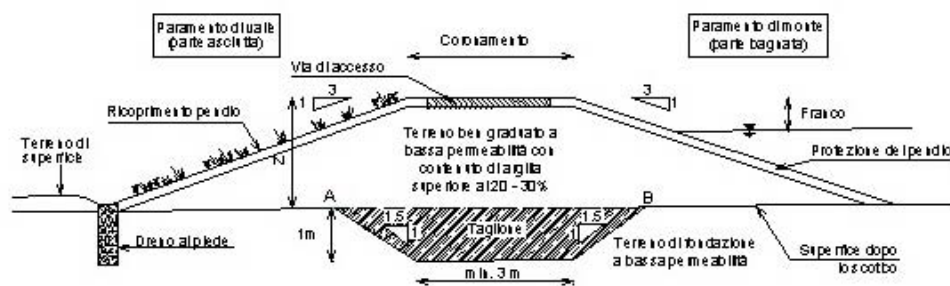
La fondazione di uno sbarramento in terra deve garantire la resistenza all'erosione per filtrazione al di sotto del piano campagna, un'adeguata capacità portante e cedimenti differenziali limitati. Le problematiche che si possono avere in fondazione sono funzione del tipo di terreno.

Una fondazione su roccia può consentire eccessive perdite attraverso le fratture e i giunti oppure valori troppo elevati della sottopressione idraulica. L'iniezione di cemento o di altri leganti può di solito contribuire alla soluzione del problema delle perdite idrauliche.

I terreni grossolani presentano una eccessiva permeabilità idraulica, problema risolvibile introducendo alla base del rilevato un setto impermeabile o rivestendo il piano di appoggio del rilevato con materiale poco permeabile. Allo scopo di impedire che si formino nel terreno di fondazione zone in cui si concentrino i percorsi di filtrazione, può essere necessario favorire il drenaggio nel rilevato, migliorando la permeabilità in alcune zone o predisponendo opere di drenaggio specifiche (tubi di drenaggio, pozzi di alleggerimento), in genere collocate nella parte di valle dell'opera. Pro-

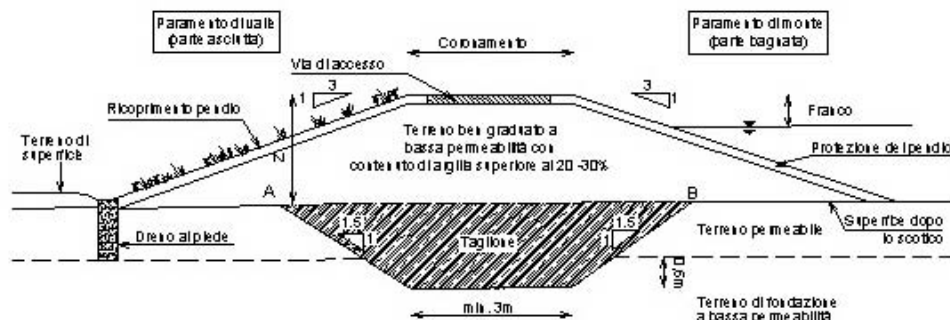
blematiche 'strutturali' possono insorgere in questi terreni in presenza di eventi sismici. Nei casi in cui il loro grado di addensamento sia inferiore a un valore di circa 50%, potrebbero verificarsi fenomeni di liquefazione con conseguente instabilità del sistema fondazione-rilevato.

Problemi di bassa capacità portante sono caratteristici specialmente dei terreni fini (argille e limi), dove la resistenza al taglio della fondazione è spesso piuttosto contenuta.



Z = altezza rilevato da piano campagna

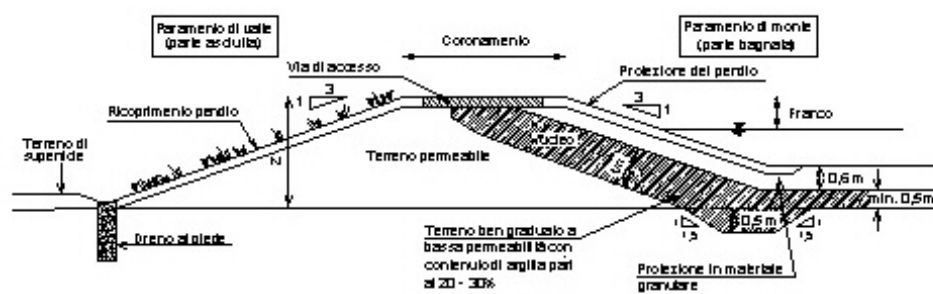
a) Diga a sezione omogenea su terreno di fondazione impermeabile



Z = altezza rilevato da piano campagna

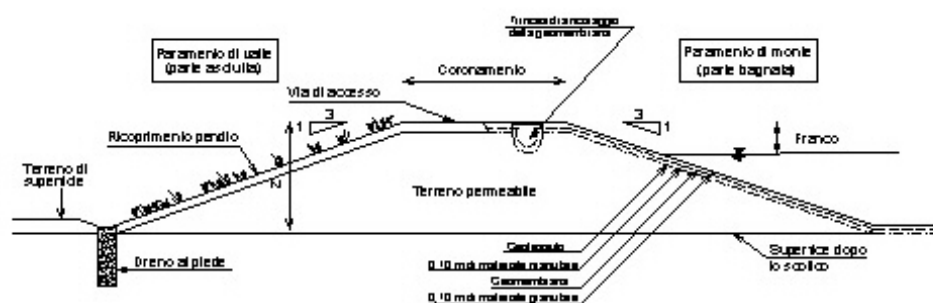
b) Diga a sezione omogenea su terreno di fondazione permeabile

Figura 3.1 Schema tipico per diga a sezione omogenea:
a) su fondazione impermeabile
b) su fondazione permeabile



Z = altezza rilevato da piano campagna

a) Diga a sezione omogenea con nucleo in argilla



Z = altezza rilevato da piano campagna

b) Diga a sezione omogenea con geomembrana

Figura 3.2 Schema tipico per diga a sezione omogenea con rivestimento:
a) in argilla
b) con geomembrana

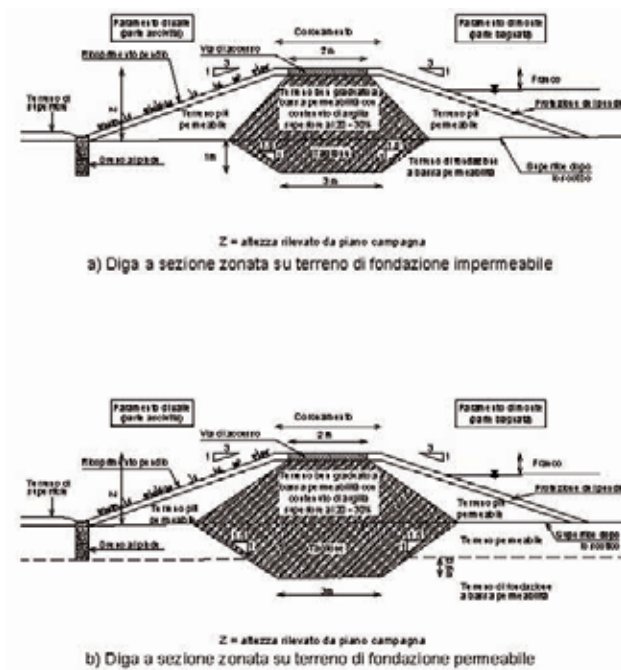


Figura 3.3 Schema tipico per diga zonata:
a) su fondazione impermeabile
b) su fondazione permeabile



Figura 3.4 Schema tipico per diga con diaframma centrale in argilla

3.3.8 Vegetazione

La vegetazione deve essere intesa come parte integrante dell'opera sia nella fase progettuale che durante la gestione e manutenzione.

La scelta della tipologia di vegetazione viene effettuata in funzione della porzione dell'invaso esaminata: paramento di monte, paramento di valle, coronamento, area intorno all'invaso, canale di adduzione e di scolo, area occupata dall'acqua dell'invaso.

Nella fase progettuale vanno considerati in particolare i seguenti aspetti:

- uso dell'invaso: se l'invaso viene utilizzato per scopi ricreativi o per creare un particolare ambiente per la fauna, il proliferare di canneti o di alghe o in generale di piante acquatiche che possono comportare normalmente problemi agli scarichi viene consentita con l'accortezza di prevedere filtri per gli scarichi;
- tipologia della vegetazione esistente e distribuzione delle radici;
- parte dell'area su cui insiste lo sbarramento.

Certe specie arbustive hanno bisogno di una grande quantità d'acqua e sviluppano un sistema radicale molto ampio. L'esperienza ha mostrato che queste specie vanno normalmente escluse nella costruzione di nuove dighe. Queste specie comprendono:

- il salice;
- il pioppo;
- l'ontano.

Altre specie richiedono una modesta quantità di acqua e sviluppano un sistema radicale abbastanza ampio. Queste specie che sono ammesse solo nell'area intorno l'invaso (a una distanza minima di 4 m) comprendono:

- la quercia;
- il sorbo selvatico;
- l'ippocastano;
- il biancospino;
- l'acero.

In linea generale, la vegetazione se inserita correttamente, offre i seguenti vantaggi:

- aggiunge un ulteriore margine di sicurezza alla stabilità dei versanti;
- contribuisce a controllare l'acqua di ruscellamento sui fianchi e sui versanti circostanti;
- costituisce una sorta di barriera naturale per scoraggiare l'accesso non autorizzato.

L'esperienza raggiunta durante i sopralluoghi sugli invasi, porta a indicare come vegetazione idonea per paramento di monte, paramento di valle, coronamento, quella erbacea. L'erba sullo sbarramento svolge il ruolo fondamentale di:

- protezione contro l'erosione superficiale dell'acqua piovana;
- controllo dell'erosione causata dall'azione delle onde e dagli svasi;
- protezione dall'azione del vento;

Al contrario, le piante ad alto fusto con il loro sviluppo radicale favoriscono la formazione di vie preferenziali per l'infiltrazione e non consentono l'ispezione dello sbarramento. Tuttavia, sugli sbarramenti già esistenti ricchi di vegetazione, il taglio delle piante di alto fusto può comportare, una volta che le radici marciscono, l'aggravamento del moto di infiltrazione.

Un discorso particolare sulla vegetazione riguarda le casse di laminazione; normalmente esse sono prive di acqua, ma nel momento in cui devono entrare in funzione la vegetazione non deve costituire ostacolo per il funzionamento. In letteratura si consiglia la coltivazione di granaglie, prati o comunque si suggerisce il controllo della crescita di piante di alto fusto che possono deviare il corso dell'acqua rispetto a quello pianificato. Tuttavia l'acqua in ingresso nelle casse non ha energia a sufficienza per poter asportare le piante di alto fusto, mentre le specie erbacee possono comportare problemi sul mantenimento ufficioso degli scarichi. Il problema può essere risolto, seminando o controllando lo sviluppo della vegetazione in funzione del periodo in cui ricorrono le piene del corso d'acqua in esame, del grado di manutenzione e delle opere di scarico.

La vegetazione può agire anche da indicatore di possibili anomalie dello sbarramento: per esempio, se sul paramento di valle si riscontra la presenza di piante tipicamente acquatiche, si può ragionevolmente supporre la presenza di fenomeni di infiltrazione attraverso lo sbarramento.

Tabella 3.2. Controllo dell'erosione

Protezione pesante

Costituisce il rivestimento consigliato per il manto di monte e i pendii interni all'invaso: è formata da una pavimentazione di pietre od altro materiale rigido e resistente (come lo spaccato di rocce). Qualora realizzata in gabbionate, occorre tenere presente che quelle acquistate pronte per l'uso possono essere economicamente vantaggiose in confronto a quelle realizzate appositamente. Le gabbionate devono avere spessore non inferiore a 200 mm e dimensioni dei singoli frammenti non inferiori a 100 mm. Altri sistemi costituiti da geotessuti o da geotessuti e bloccanti sono meno economici. Sacchi riempiti di miscela di cemento e sabbia possono fornire una alternativa facilmente realizzabile ed economica, ma di aspetto poco gradevole (se ne consiglia l'uso accompagnato da una curata disposizione della vegetazione che ne attenui l'impatto visivo). Dove il bacino sia tenuto costantemente al massimo livello, l'estensione della protezione può essere contenuta nell'ambito di ± 1 metro dalla posizione di regime, il resto del pendio essendo seminato ad erba.

Protezione leggera

Utilizza la vegetazione come mezzo antierosione sia da sola che insieme a materiali naturali come il legname, il sottobosco, etc: un geotessuto può essere previsto per facilitare la presa e coagulare l'azione dei materiali naturali. Spesso sono utilizzate piante arbustive che formano un bordo protettivo lungo il pelo dell'acqua, in modo da ridurre l'azione erosiva del moto ondoso, mentre gli apparati radicali superficiali irrobustiscono il terreno. Queste piante non attecchiscono o si sviluppano solo parzialmente nel caso in cui il livello dell'acqua non sia stabile. La principale azione protettiva della vegetazione al di sotto del livello dell'acqua è il rinforzo del terreno ad opera delle radici. In questo senso anche le radici della vegetazione più piccola, spesso nella forma di rizoma, possono aiutare a stabilizzare e rinforzare il terreno. Le principali specie di vegetazione utilizzate per la protezione leggera sono le canne, l'erba a prato. Non è consentito l'utilizzo di alberi ad alto fusto sul rilevato.

Protezione in presenza di un livello variabile dell'acqua nel bacino

Problemi particolari sorgono nei bacini soggetti a una variazione frequente e ampia del livello dell'acqua. In essi la protezione ideale dovrebbe essere estesa a tutto il paramento di monte. In questo caso la sola protezione vegetale non è adatta a sopportare periodi asciutti e periodi in cui si trova sommersa da diversi metri d'acqua. La protezione di tipo pesante invece è anti-economica, soprattutto quando il bacino interessato dal fenomeno è del tipo fuori alveo con sviluppo arginale notevole. Le dighe a scopo irriguo che ricadono in questa categoria hanno sofferto in passato di notevoli fenomeni erosivi, con spessori di terreno eroso vicini ai 10 cm per anno solo in seguito al primo riempimento. Una soluzione economica a questa problematica è quella di sovrapporre uno strato di materiale lungo il paramento di monte che possa venire liberamente eroso. L'aumento minimo della larghezza in sommità al rilevato, necessaria per contrastare nel tempo i fenomeni dovuti a frequenti episodi di variazione del livello di invaso deve essere pari ad almeno 2 m ed è funzione della quantità di vegetazione presente in prossimità del livello massimo d'invaso.

Nel caso di invasi esistenti che presentino sponde erose di circa 20 cm, è necessario intervenire al primo svuotamento dell'invaso, sul paramento, con la stesa di uno strato di terreno per ripristinare la sezione originaria del medesimo. Può alle volte rivelarsi opportuno procedere anche alla sistemazione di una protezione pesante sulle sponde, per evitare che il protarsi dell'erosione provochi smottamenti nell'invaso.

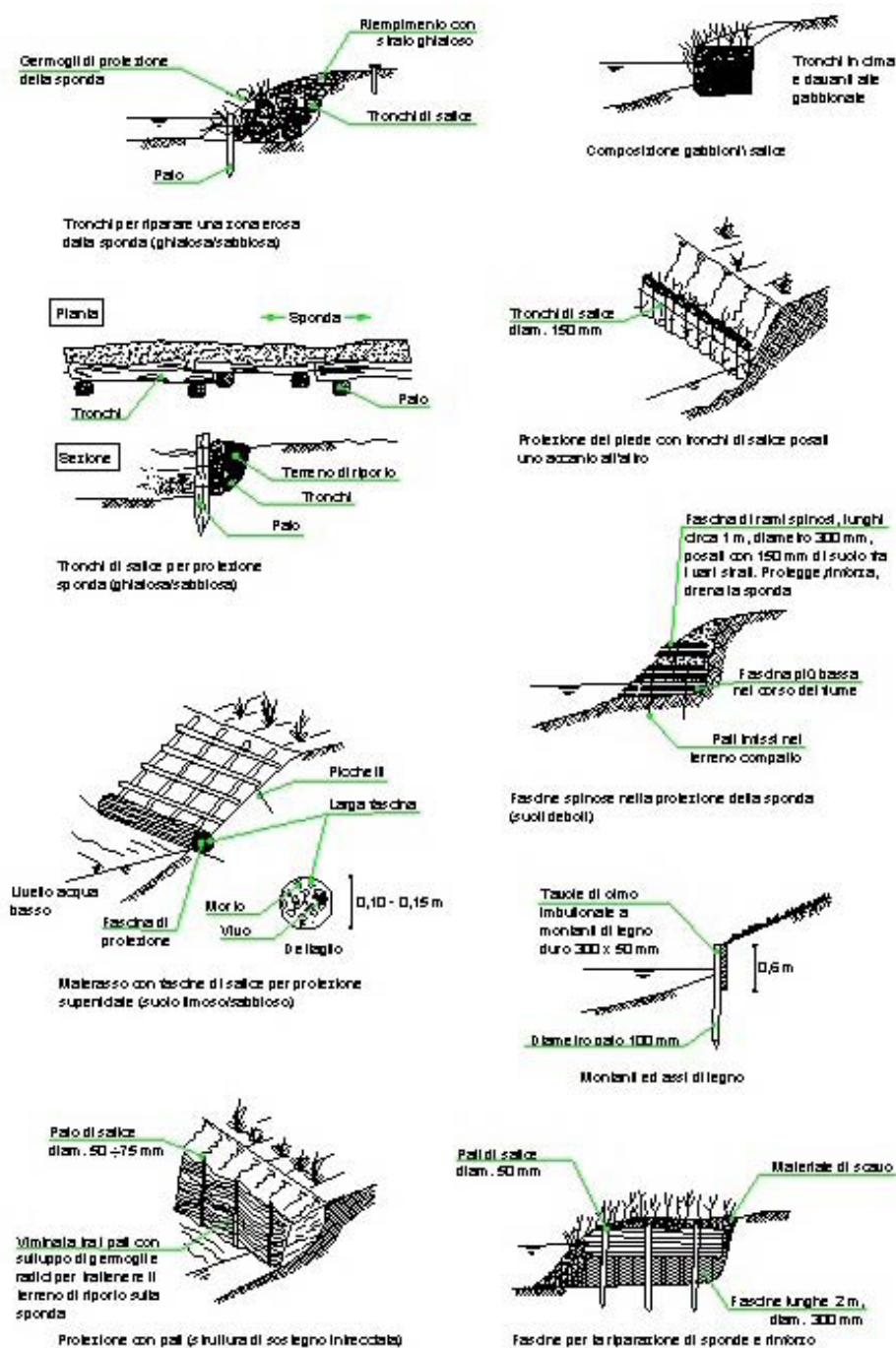


Figura 3.5a Metodi protettivi della scarpata delle sponde escluso lo sbarramento

Figura 3.5a Metodi protettivi della scarpata delle sponde escluso lo sbarramento

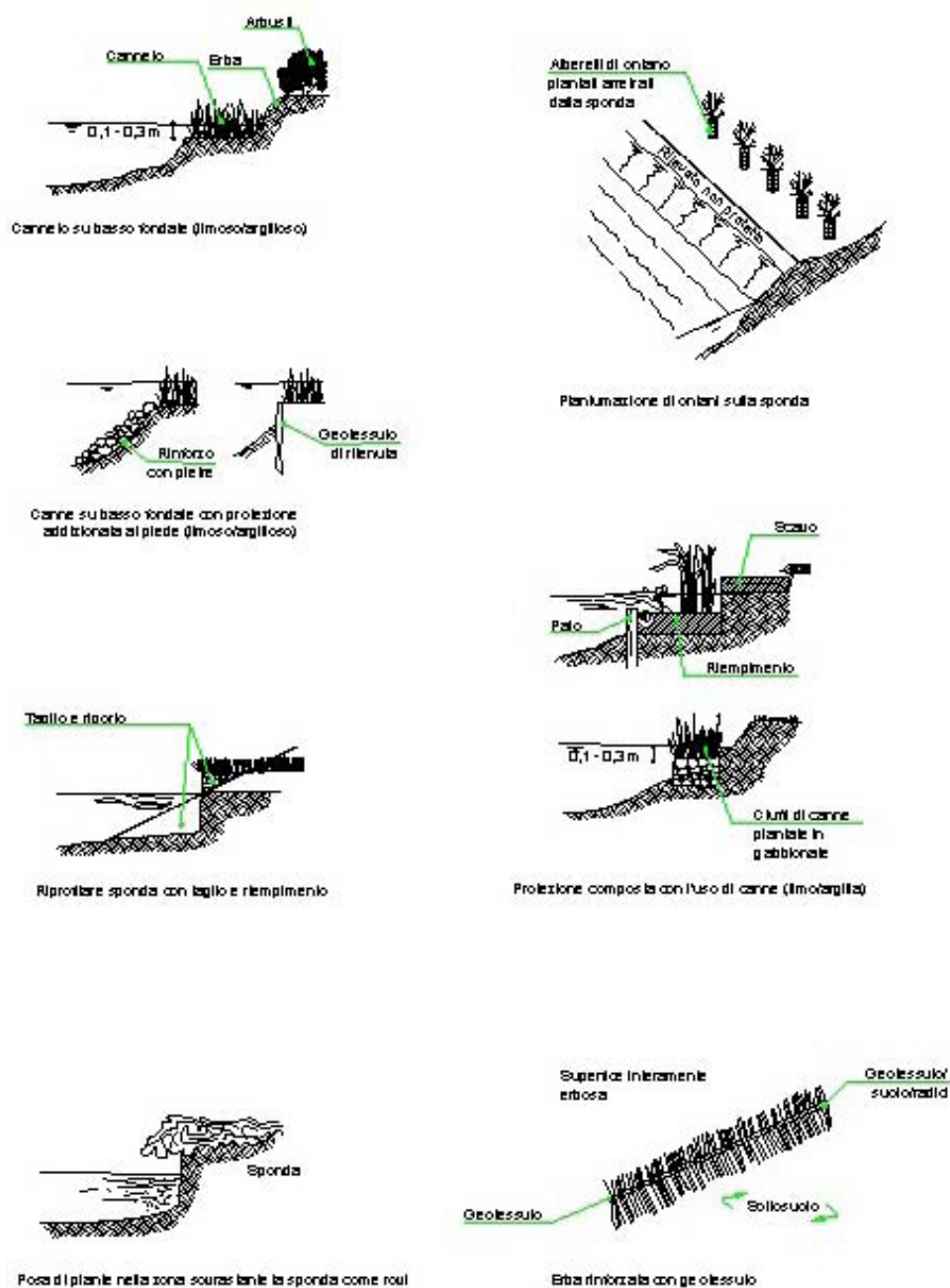


Figura 3.5b Metodi protettivi della scarpata delle sponde escluso lo sbarramento

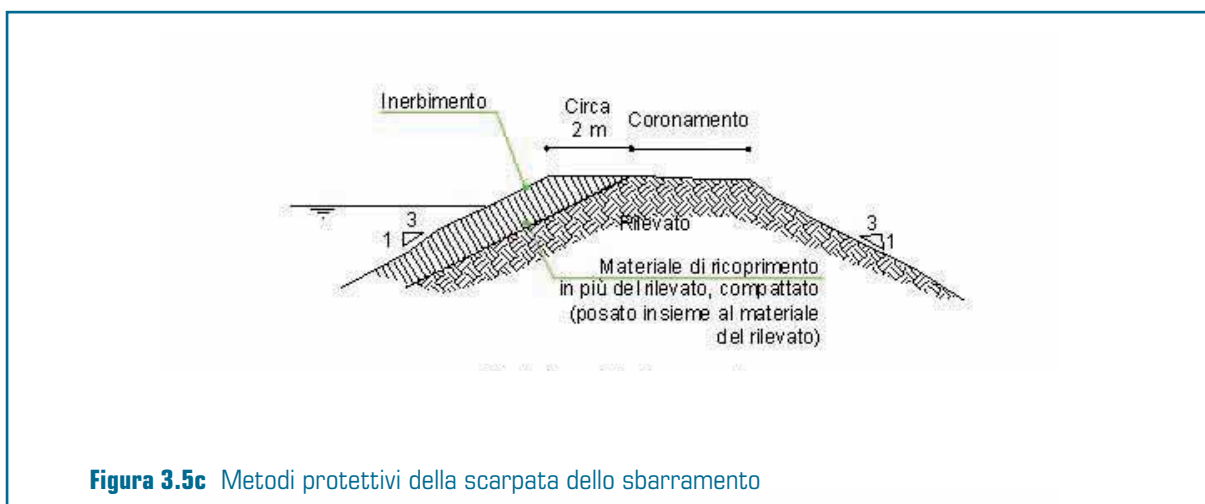


Figura 3.5c Metodi protettivi della scarpata dello sbarramento

3.3.9 Materiali di rivestimento

Come materiali di rivestimento sono intesi quelli che possono essere utilizzati per formare una barriera impermeabile su un substrato permeabile. I più ricorrenti sono:

- le geomembrane;
- l'argilla;
- i materiali bentonitici.

Generalmente la stabilità a lungo termine del materiale di rivestimento è assicurata quando i paramenti hanno inclinazione minore di 1:3. Lo strato di materiale posto al di sotto del rivestimento impermeabile deve avere distribuzione granulometrica ben graduata così da fornire una superficie ragionevolmente uniforme, evitando irregolarità, cambiamenti di profilo, vuoti localizzati o protuberanze che potrebbero causare tanto instabilità che perdita di efficienza idraulica. Controlli e misure per ovviare all'accumulo di acqua o gas al di sotto del materiale di rivestimento possono essere necessari in molte circostanze.

E' bene prestare particolare attenzione nei casi in cui il rivestimento interagisce e incontra strutture in calcestruzzo o tubazioni appartenenti all'opera di sbarramento. In particolare occorre evitare che si formino pericolosi percorsi di filtrazione adottando appropriate scelte progettuali e controllando che le tecniche costruttive utilizzate siano soddisfacenti. I lavori successivamente necessari per ovviare alle infiltrazioni che si svilupperebbero nel caso in cui tali accorgimenti non fossero adottati sono particolarmente difficili e onerosi.

Geomembrane

La geomembrana è un materiale artificiale, sottile, relativamente flessibile ed elastico, che grazie a queste sue caratteristiche riesce a modellarsi secondo le irregolarità del materiale su cui poggia e può accettare limitate deformazioni dopo la posa in opera. Marcate irregolarità e bruschi cambiamenti di forma delle superfici da rivestire potrebbero comunque provocare danni funzionali e lacerazioni. Ancoraggio e sovrapposizione laterale dei diversi strati di materiale impermeabile sono operazioni da eseguirsi con molta attenzione per garantire una soddisfacente funzionalità globale dell'opera.

Scelta dei materiali

Diversi materiali sintetici sono utilizzati come geomembrana di copertura. Essi sono classificati come:

- materiali in polietilene;
- materiali in polimeri clorati;
- materiali in gomma.

Le coperture in polimeri clorati e quelle in polietilene sono suscettibili al deterioramento quando esposte ai raggi ultravioletti, per cui è essenziale che vengano protette. Entrambi i tipi di copertura sono disponibili con spessori da 0.3 mm a più di 3 mm: uno spessore minimo di 1.5 mm è consigliabile per assicurare una buona resistenza. Il ritiro conseguente all'abbassamento della temperatura è modesto.

I materiali in gomma sono generalmente più cari, ma offrono resistenze maggiori al degrado per esposizione alla luce ultravioletta o per deterioramento nonché contro gli strappi. Le membrane in gomma sono anche disponibili come materiale rinforzato con fibre sintetiche, generalmente in polipropilene o nylon, incastrate fra fogli impermeabili. Ciò accresce la resistenza agli strappi e la resistenza alla foratura, ma non ha effetto sulla resistenza alla corrosione o al degrado prodotti dalla luce ultravioletta. Rispetto al materiale in gomma non rinforzato, la messa in opera di quelle rinforzate è più complessa per difficoltà nella sovrapposizione laterale dei teli.

Le scelte del tipo di copertura a membrana deve basarsi su:

- adattabilità;
- durabilità;
- l'esperienza acquisita o offerta da fornitore e installatore;
- requisiti di manutenzione necessari.

Aspetti progettuali

L'inclinazione appropriata dei fianchi dello sbarramento (consigliata comunque inferiore a 1:3) deve essere definita anche a seguito di considerazioni progettuali inerenti la stabilità della geomembrana e del materiale di protezione superficiale. Si deve inoltre tenere conto che attraverso la geomembrana si creano gradienti idraulici molto elevati (fino a 10): ciò significa, tra l'altro, che l'acqua invasata influisce qui come un vero e proprio carico sugli strati sottostanti, inducendo anche cedimenti maggiori rispetto a quelli di uno sbarramento non rivestito.

La geomembrana va installata su una superficie di posa preparata in modo da non indurre danni durante l'installazione e la vita dell'opera. Tale superficie deve essere resistente, compatta e priva di pietre o di terreno agricolo o di altro materiale non adatto: si può fare ricorso a uno strato di sabbia compattata avente spessore di almeno 10 cm.

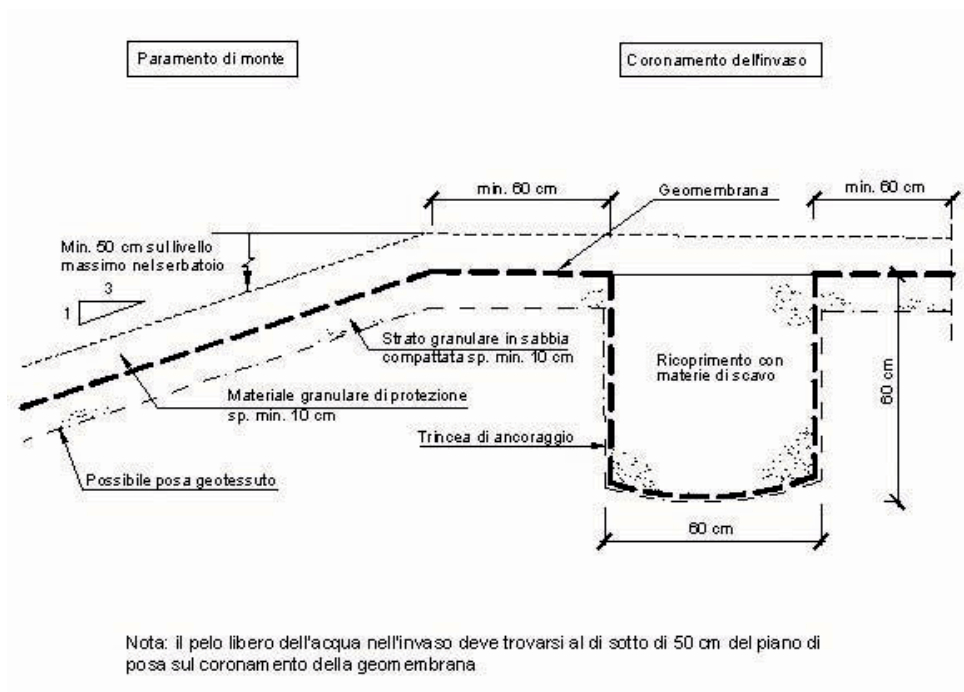


Figura 3.6 Dettaglio della trincea di ancoraggio della geomembrana

Il rivestimento va reso stabile mediante ancoraggio lungo la sommità dell'argine e il perimetro dell'invaso: l'ancoraggio può essere costituito da una trincea a forma di U di dimensioni non inferiori a 60 cm x 60 cm. Un dettaglio tipico dell'ancoraggio è mostrato in Figura 3.6.

Esistono due metodi base per poter effettuare la sovrapposizione laterale della geomembrana che dipendono dal materiale costituente la stessa:

- Solvente / adesivo per materiali in gomma o in polimeri clorati
- Aria calda / saldatura per materiali in polietilene

I giunti del rivestimento sono i punti potenzialmente più esposti all'infiltrazione, sicché la giunzione va eseguita con particolare cautela, facendo tra l'altro attenzione a che il materiale in prossimità del giunto sia pulito. Per il giunto si può ricorrere alla doppia saldatura con camera d'aria interna predisposta per il collaudo, al fine di ottenere una sicura impermeabilizzazione.

Nel caso in cui sia presente un livello piezometrico superiore alla quota di fondo del bacino, lo svuotamento del medesimo causa una sottopressione allargata sulla membrana. La disposizione al di sotto della geomembrana di uno strato di materiale granulare collegato ad un sistema di drenaggio facilita lo smaltimento dell'acqua contribuendo alla riduzione della sottopressione. Una soluzione alternativa consiste nella realizzazione di un contrappeso contrastante la spinta dell'acqua di falda.

Argilla

L'impermeabilizzazione del fondo mediante argilla è un'opzione conveniente in particolare quando questa sia disponibile nelle vicinanze del sito. L'efficienza di un rivestimento in argilla dipende da diversi fattori:

- le caratteristiche fisico meccaniche del terreno argilloso disponibile (contenuto di argilla, plasticità e resistenza al taglio);
- il metodo di scavo e di posa;
- il metodo di compattazione;
- lo spessore dello strato introdotto;
- la deformazione dello strato dopo la posa (fluttuazione del livello dell'acqua nel bacino, livello piezometrico, rotture, cedimenti);
- la destinazione d'uso del bacino.

Le caratteristiche richieste al terreno argilloso sono tanto più restrittive quanto più sottile è lo strato a disposizione. Il terreno di rivestimento dovrebbe assicurare un'impermeabilizzazione paragonabile a quella fornita dal nucleo di tenuta. Il contenuto di argilla non deve essere eccessivo soprattutto nei casi in cui il livello di invaso vari frequentemente poiché tali condizioni potrebbero indurre essiccamento e diminuzione di volume con successiva fratturazione. Per ridurre il rischio che ciò avvenga nei punti in cui lo strato è maggiormente soggetto alle variazioni di livello si può ricorrere a una copertura in materiale granulare spessa almeno 60 cm. Tale soluzione va estesa alle zone del rilevato esposte al massimo abbassamento del livello d'acqua e alle zone coperte d'acqua fino a 30 cm di profondità.

Un buon rivestimento impermeabile in terreno argilloso deve avere uno spessore pari ad almeno 50 cm (da compattato) o maggiore nei punti in cui le caratteristiche del terreno sono più scadenti.

Bentonite

La bentonite può essere utilizzata come materiale di rivestimento sia da sciolta (in polvere o granulare) o inserita in strati compositi (incastrata fra geotessuti).

La bentonite sciolta può essere mescolata con il terreno presente in sito e compattata, formando uno strato a permeabilità minore rispetto al fondo originario del bacino oppure introdotta pura in strati compattati. In entrambi i casi il rivestimento va ricoperto con terreno selezionato e compattato.

Quando inserita tra geotessili, la bentonite forma uno strato a bassissima permeabilità, simile a quello offerto dalla bentonite pura sciolta. Questo strato composito deve essere ricoperto con terreno opportunamente selezionato e compattato.

Scelta del materiale

La bentonite è un'argilla smectitica presente in natura in forma calcica e sodica. Quella calcica può venire trattata chimicamente con cenere di soda e trasformata in calcico-sodica (o attivata). Sono di seguito indicate le principali caratteristiche delle diverse forme di bentonite, congiuntamente ai suggerimenti per l'applicazione pratica.

- bentonite sodica naturale (utilizzo molto estensivo):
 - rigonfiamento pari a $10 \div 15$ volte il proprio volume originario;
 - capacità di assorbimento dell'acqua pari a più di 5 volte il proprio peso in volume secco.
- bentonite calcica naturale (utilizzo limitato):
 - capacità di rigonfiamento pari a $3 \div 4$ volte il proprio volume originario;
 - capacità di assorbimento dell'acqua pari a più di 1.5 volte il proprio peso volumetrico secco.
- bentonite attivata (utilizzo limitato, generalmente piccole applicazioni):
 - capacità di rigonfiamento pari a $8 \div 9$ volte il proprio volume originario;
 - capacità di assorbimento dell'acqua pari a $2 \div 3$ volte il proprio peso volumetrico secco.

La bentonite può essere impiegata nel rivestimento del bacino in tre modalità differenti:

- creazione della copertura di rivestimento in sito – mescolando direttamente uno strato di bentonite e il terreno presente sul fondo del bacino;
- miscelazione e successiva posa della copertura – mescolando bentonite e sabbia con successiva posa sul fondo del bacino;
- copertura in pura bentonite – ponendo la bentonite pura sul fondo del bacino.

Aspetti progettuali

Gli aspetti progettuali relativi all'uso delle geomembrane possono essere adottati anche per i rivestimenti in bentonite.

3.3.10 Geotessuti

L'uso del geotessuto nella costruzione di piccoli invasi in materiale sciolto ha avuto uno sviluppo relativamente recente. I geotessuti sono materiali ad elevata permeabilità utilizzati per separare terreni con granulometrie diverse, permettendo un drenaggio sicuro senza problemi erosivi.

Geotessuti per applicazioni drenanti

Il geotessuto viene utilizzato nella costruzione dei sistemi drenanti perché assicura una netta separazione fra il terreno sottoposto a drenaggio e il materiale costituente il dreno stesso. E' caratterizzato da una permeabilità tale che il flusso di filtrazione nell'attraversarlo sviluppa una resistenza trascurabile. Il geotessuto consente di prevenire le perdite localizzate dovute a erosione per velocità di filtrazione troppo elevate, minimizzando l'intasamento della condotta drenante e assicurando al dreno durata e funzionalità superiori. Perché possa svolgere correttamente la sua funzione drenante, deve essere progettato in modo tale che le dimensioni dei suoi pori si adattino alla distribuzione granulomentrica del terreno circostante. In Figura 3.7 sono riportati alcuni casi che illustrano l'uso del geotessuto nei sistemi di drenaggio.

Progettazione dei geotessuti

La distribuzione granulometrica delle particelle costituenti il terreno da drenare si stabilisce eseguendo delle prove su campioni prelevati in sito. Si applicano i seguenti criteri. Si devono verificare entrambe le seguenti condizioni:

- $D_{85} \geq O_{90}$ per prevenire la perdita di terreno attraverso il dreno
- $D_{15} \leq O_{90}$ per assicurare una adeguata permeabilità del dreno

in cui: D_{85} = dimensione della particella di terreno rispetto alla quale l'85% delle ulteriori particelle rappresentanti il terreno hanno dimensione inferiore.

D_{15} = dimensione della particella di terreno rispetto alla quale il 15% delle ulteriori particelle rappresentanti il terreno hanno dimensione inferiore.

O_{90} = dimensione dei pori del geotessuto rispetto al quale il 90% dei pori ha dimensione inferiore.

I limiti che indicano l'appartenenza di un terreno alla classe granulare o alla classe coesiva, sono indicati in Figura 3.7 e 3.8. D_{85} e D_{15} sono determinati mediante prova granulometrica.

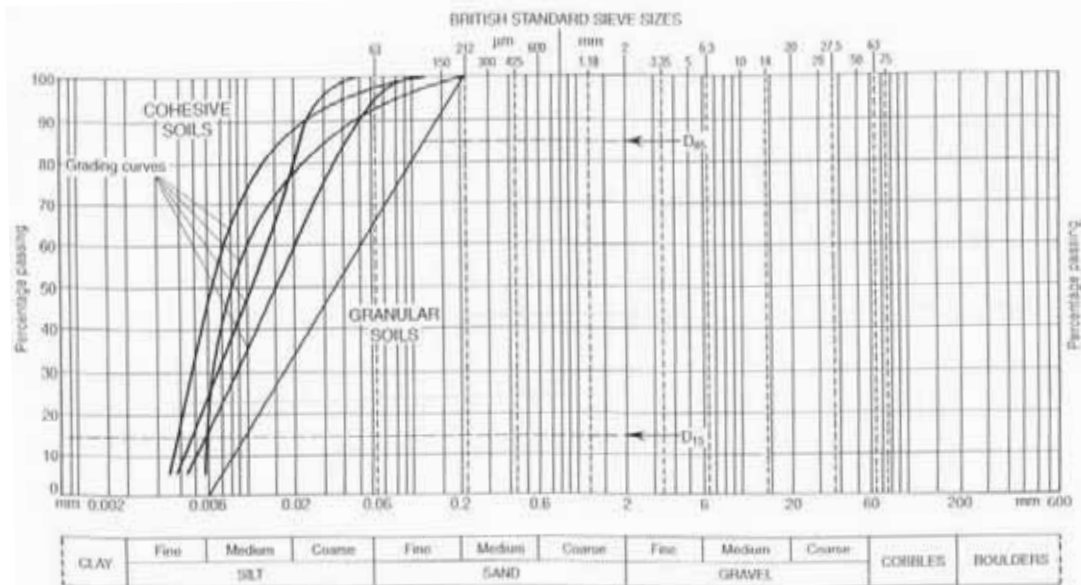


Figura 3.7 Esempio di curva granulometrica per terreno coesivo

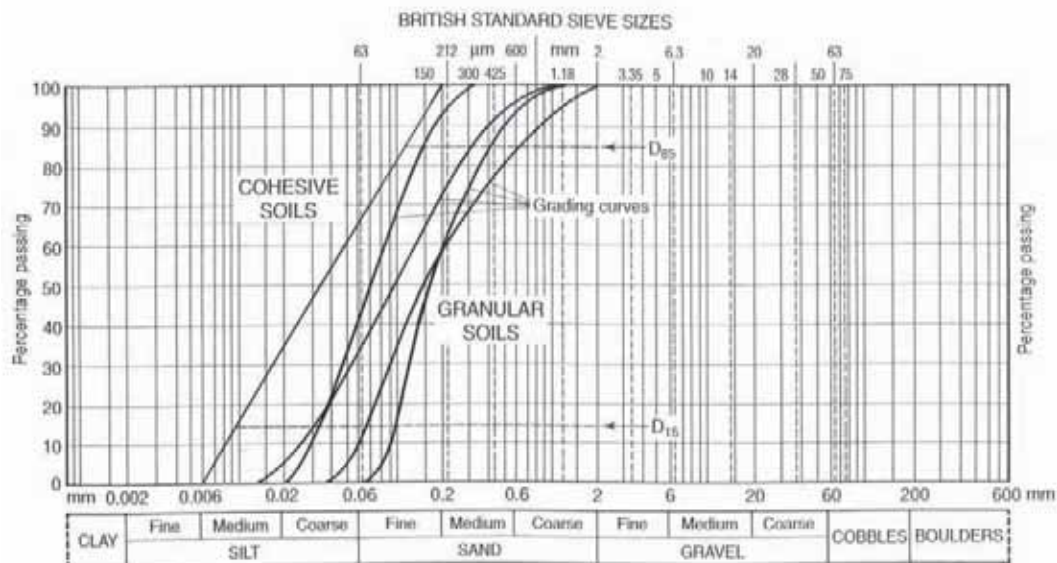


Figura 3.8 Esempio di curva granulometrica per terreno granulare

Geotessuti per il controllo dell'erosione

I geotessuti vengono frequentemente utilizzati anche per accrescere la protezione del terreno contro l'erosione, ad esempio per rinforzare la crescita del manto erboso lungo i fronti del rilevato. L'installazione va effettuata in accordo con le disposizioni di fabbrica ed eseguendo il ricoprimento per prevenire la sottoppressione che l'acqua di filtrazione può determinare.

3.3.11 Condotte

Le condotte vanno fatte passare esternamente allo sbarramento, limitando il contatto fra la tubazione e il terreno. E' possibile inoltre prevederne il passaggio nel terreno di fondazione al di sotto del rilevato: per evitare che le condotte subiscano danni rilevanti dovuti a cedimenti differenziali è importante che siano posizionate a una profondità sufficiente e che siano sufficientemente flessibili, assecondando i cedimenti e resistendo alle sollecitazioni indotte da questi. Le condotte passanti nel terreno di fondazione dovranno normalmente essere in ghisa sferoidale o in cemento armato. L'importanza della scelta della tipologia di condotta da utilizzare discende tra l'altro dal fatto che il costo per una loro risistemazione e riparazione non è usualmente sostenibile per piccoli invasi.

Tipologie di tubazioni

Le tipologie comunemente utilizzate sono descritte in Tabella 3.3. Informazioni sulle tipologie presenti sul mercato sono riportate nei cataloghi e nelle pubblicazioni emesse dalle industrie costruttrici. E' importante porre la giusta cura nello studio della durabilità, della qualità del materiale e nell'esecuzione dei lavori di posa.

Nella scelta del tipo di condotta sono importanti le considerazioni riguardanti la fase realizzativa ed è fondamentale che tale scelta venga fatta adottando un approccio conservativo. Nel caso in cui le tubazioni vengano interrate, la profondità e l'ampiezza della trincea condizionano il carico trasmesso. La Tabella 3.4 indica l'ampiezza minima di realizzazione della trincea per la posa di tubazioni con dimensioni standard, considerando che ampiezze maggiori ne facilitano la posa e che l'uso dei metodi di sostegno facilita lo scavo a maggiori profondità. La presenza della trincea in cui verrà fatto passare il condotto nel terreno di fondazione produce effetti sia sul rilevato che sulle altre strutture poggianti: è molto importante considerare questo aspetto in fase progettuale.

Tabella 3.3. Tipologie di tubazioni

Condotti a pressione	
• Ghisa sferoidale	Tubazioni rigide collegate con giunti flessibili. La loro capacità di sopportare i carichi e la loro resistenza al deterioramento le rende adatte in tutte le condizioni; il costo elevato ne limita l'utilizzo a situazioni in cui il carico del terreno è molto alto, come nello scarico di fondo di un vaso. Può essere necessaria una protezione contro la corrosione nei terreni aggressivi, particolarmente attorno a certe tipologie di giunti flessibili.
• Acciaio	La resistenza dell'acciaio e il suo grado di flessibilità lo rendono adatto all'uso in ogni situazione; la durabilità è limitata dalla corrosione. I giunti flessibili sono raramente necessari. Tutte le tubazioni sono protette dalla corrosione se galvanizzate, ricoperte di bitume o avvolte con materiale inerte (o utilizzando altri metodi). Il loro utilizzo è limitato nei casi in cui sia difficile il lavoro di manutenzione e sostituzione.
• Polietilene	Tubazioni meno resistenti rispetto a quelle in ghisa o in acciaio, più resistenti di quelle in PVC. Flessibili a tutte le temperature, sono utilizzate nelle condotte di pompaggio dei bacini fuori alveo. Hanno una grande resistenza al deterioramento, ma per flessibilità e ridotta resistenza richiedono un'appropriata copertura.
• PVC	Tubazioni meno flessibili di quelle in polietilene alle normali temperature, diventano fragili a basse temperature. Leggere e con elevata resistenza al deterioramento. La bassa resistenza meccanica e la scarsa flessibilità impongono un'accurata scelta del materiale di ricoprimento. Poco adatte ad alte pressioni con improvvisi aumenti di portata.
• C.A. realizzato per centrifugazione	Tubazioni rigide, necessitanti di giunti flessibili. La loro resistenza le rende adatte all'uso in ogni situazione, eccetto nei casi in cui l'acqua o il terreno con cui vengono a contatto abbiano un elevato contenuto di solfati.

Copertura delle tubazioni

Copertura e rivestimento delle tubazioni assicurano maggiore durabilità, evitando effetti indesiderati sul rilevato e sul bacino d'invaso. Il terreno con cui si ricopre la tubazione deve essere adatto alla sua resistenza: spesso il terreno presente inizialmente in trincea non ha le caratteristiche adatte per essere riutilizzato come copertura. I terreni granulari soddisfano i criteri di sicurezza indicati in Tabella 3.5 e vengono utilizzati frequentemente. La capacità portante deve essere tale da sopportare il carico trasmesso dallo sbarramento. In alcuni casi può essere necessario l'uso di una copertura o di un rivestimento in calcestruzzo. Per limitare il flusso indotto attraverso le trincee dal materiale di riempimento granulare è consigliabile l'inserimento di una serie di taglioni in argilla o in calcestruzzo.

Tabella 3.4. Minima larghezza della trincea per posa tubazioni

Dimensione nominale tubazioni [mm]	Diametro esterno tubazione [mm]	Larghezza trincea [m]
100	130	0.55
150	190	0.60
225	280	0.70
300	380	0.85
375	500	1.05
450	620	1.15
525	670	1.20
600	790	1.35
675	880	1.45
750	950	1.50
825	1040	1.60
900	1120	1.90
975	1200	2.00
1050	1300	2.10

NOTA: La larghezza della trincea è solo indicativa. In fase di realizzazione si devono prendere in considerazione diversi fattori, quali la stabilità del terreno, la profondità di scavo e il metodo utilizzato per sostenere lo scavo.

Collari antifiltrazione

I collari antifiltrazione devono essere previsti attorno a qualsiasi condotta o canale passante al di sotto del corpo diga dello sbarramento. Devono essere realizzati successivamente alla posa del condotto e al riempimento della trincea. Il collare deve estendersi all'interno del terreno indisturbato per almeno 500 mm lungo tutta la sezione trasversale della trincea per aumentare il percorso di filtrazione ed essere baricentrico rispetto alla tubazione o al canale e di ciò occorre tener conto nella definizione delle quote di scavo e di posa delle condotte. Il collare dovrà essere realizzato in calcestruzzo resistente agli agenti corrosivi eventualmente presenti nell'acqua sotterranea, in un unico getto e ben compattato.

Tabella 3.5. Caratteristiche del terreno di ricoprimento delle tubazioni

Granulometria	– da 5 mm a 50 mm, terreno pulito e libero dalle particelle fini (spesso descritto come “lavato”)
Solubilità	– devono essere evitate le sostanze evaporitiche, come il gesso idrato o il salgemma. Il calcare non può essere utilizzato quando l'acqua è acida
Durabilità	– il terreno non deve deteriorarsi dopo l'installazione
Resistenza al taglio	– tale da opporsi agli effetti del trasporto, del rimaneggiamento, dello stoccaggio e della posa.



CAPITOLO 4

ASPETTI COSTRUTTIVI



ASPETTI COSTRUTTIVI

4.1 Considerazioni generali

La costruzione dell'opera di invaso deve essere effettuata cercando di mantenere uno stretto legame con le precedenti fasi relative alla valutazione di fattibilità, all'esecuzione e interpretazione delle indagini in sito e delle scelte di progettazione. L'approccio dev'essere il più flessibile possibile, consentendo l'adeguamento del progetto ai riscontri geotecnici aggiuntivi ottenuti durante la costruzione.

4.1.1 Condizioni climatiche

Le variazioni climatiche che si verificano durante la fase di realizzazione dell'invaso possono influenzare sostanzialmente operatività e tempistica. In particolare la programmazione dei lavori di movimento terra (scavo, trasporto e posa del terreno di costruzione) deve tener conto delle variazioni climatiche stagionali. Per evitare ritardi eccessivi è consigliabile che i lavori di costruzione dell'opera di invaso non abbiano inizio nei mesi autunnali e primaverili, periodi in cui gli eventi piovosi sono più frequenti. La Tabella 4.1 riassume le problematiche più comuni legate a condizioni meteorologiche avverse.

Tabella 4.1. Effetti sul terreno delle avverse condizioni climatiche

Congelamento	Condiziona i getti di c.l.s. Il terreno non è adatto ad essere lavorato (gli strati di terreno più interni risultano meno esposti al congelamento). Aumenta però la resistenza al taglio dello strato superficiale del terreno lungo le vie di accesso al sito.
Pioggia intensa	Condiziona i getti di c.l.s. La superficie stradale è caratterizzata dalla presenza di solchi che incrementano la stabilità al ribaltamento dei mezzi di trasporto ma ne riducono la velocità. Il terreno già posato diviene completamente saturo. Dopo il verificarsi di pesanti piogge nell'area di prestito e nell'area di costruzione del manufatto di sbarramento, non può essere utilizzato il terreno che subisce un apprezzabile aumento del contenuto d'acqua.
Caldo intenso	Il rapido essiccamento del terreno può condizionare il getto del c.l.s. L'essiccamento e la fessurazione del terreno coesivo impongono l'innaffiamento dello stesso. La velocità di trasporto aumenta a causa della riduzione del contenuto d'acqua e quindi scompaiono i solchi lungo le vie di accesso e nell'area di lavoro.
Vento	Tende a dare gli stessi effetti del caldo intenso. Possibili problemi per lo sviluppo di polvere eccessiva.

4.1.2 Limitazioni dell'area di lavoro

In fase progettuale si predispongono planimetrie su cui sono riportati: i confini dell'area su cui sorgerà l'opera e delle aree dove reperire il terreno da costruzione, la viabilità di accesso al sito e un inquadramento dei vincoli territoriali e ambientali con l'indicazione della destinazione d'uso dell'area circostante l'invaso. Si deve provvedere alla recinzione temporanea per evitare l'ingresso di animali o persone non autorizzate.

Se sono presenti specie animali e vegetali protette o strutture aventi un valore storico-culturale, si deve provvedere alla recinzione dell'area in cui si svolgeranno i lavori, escludendo e proteggendo le zone soggette a vincolo.

Il primo passo della costruzione è rappresentato dal tracciamento del manufatto sul terreno mediante l'uso di picchetti: tale lavoro va eseguito con attenzione e precisione ed è fondamentale che i picchetti "chiave" vengano posizionati in prossimità di elementi fissi (quali alberi, tralicci, strutture esistenti, etc.).

Vanno segnalate mediante picchetti:

- l'allineamento centrale del corpo diga;
- gli estremi del coronamento della diga;
- la posizione del piede dei paramenti di monte e di valle del rilevato;
- la posizione del nucleo impermeabile (nel caso in cui la posizione del nucleo sia centrale e caratterizzata dalla stessa larghezza della sommità del rilevato, verrà picchettata solo quest'ultima);
- la posizione e la lunghezza degli organi di sfioro;
- la localizzazione delle strutture ausiliarie al manufatto e i sistemi di drenaggio;
- il tracciato dei sottoservizi o delle strutture interrato da non coinvolgere durante scavo e costruzione dello sbarramento.

Il responsabile dell'impresa appaltatrice e il direttore dei lavori devono effettuare il tracciamento iniziale dell'allineamento centrale dello sbarramento, determinando l'inizio dell'esecuzione dei lavori. Successivamente l'impresa effettuerà tutti gli ulteriori tracciamenti che verranno verificati dal direttore dei lavori. I picchetti andranno distanziati di circa 25 m.

4.1.3 Vie d'accesso

Le vie di accesso all'area possono essere condizionate da:

- presenza di servizi – aerei;
– sotterranei;
- limitate vie di accesso o strade di pubblico passaggio strette o tortuose;
- limitate o strette vie di accesso fra le cave di prestito e il sito;
- limitazioni di carico su strade o strutture per il passaggio di mezzi pesanti;
- condizioni di terreno debole, tenero o umido.

Per permettere agli automezzi di raggiungere l'area d'invaso può risultare indispensabile realizzare nuove vie o eseguire il miglioramento della viabilità esistente. E' altresì importante procedere allo scoticamento dello strato superficiale di terreno lungo il tracciamento delle strade di accesso all'area per prevenirne un eccessivo danneggiamento. Nel caso in cui lo strato di terreno risulti ancora soggetto a danneggiamento si provvederà alla posa di uno strato temporaneo di materiale ghiaioso. Può essere necessaria la posa di uno strato di geotessuto al di sotto del selciato stradale, possibilmente accompagnato da opere di drenaggio temporanee, per prevenire la perdita del terreno granulare nello strato di fondo. Al termine dei lavori di costruzione del manufatto le vie di accesso temporanee al sito potranno essere rimosse e si dovrà procedere al ricollocamento del terreno di scotico rimosso inizialmente.

Nella pianificazione della viabilità va ricordato che le strade dovranno sostenere mezzi di lavoro richiedenti larghezza maggiore, inclinazione inferiore e raggi di curvatura più ampi rispetto ai normali automezzi, perché caratterizzati da inferiore manovrabilità. In questa fase si deve stabilire se esiste la possibilità di poter rimuovere temporaneamente staccionate e barriere, riducendo la lunghezza del percorso di trasporto e il consumo di carburante.

La scelta delle modalità operative connesse alla costruzione delle vie di accesso è normalmente lasciata all'impresa costruttrice, fatte salve disposizioni differenti chiaramente specificate nella documentazione di contratto. Va ricordato come gli automezzi per il trasporto del materiale e dei macchinari di movimento terra per raggiungere il sito debbano percorrere infrastrutture viarie di pubblico accesso. E' necessario concordare con le autorità locali competenti le modalità per il passaggio degli automezzi, concedere all'impresa le necessarie autorizzazioni, segnalare agli utenti la presenza del traffico pesante e garantire la pulizia periodica del tratto viario interessato.

4.2 Servizi

All'interno dell'area in cui sorgerà l'invaso deve essere individuata la presenza di tutti i servizi appartenenti a gestori pubblici o privati, determinandone l'esatta posizione prima dell'inizio dei lavori. Adeguate norme di sicurezza vanno adottate nello svolgimento di quei lavori che avvengono al di sotto o in prossimità delle aree in cui passano tali servizi e, se necessario, possono essere erette barriere protettive ed esposti dei segnali di pericolo.

Tutte le autorità responsabili del monitoraggio dei corsi d'acqua, delle reti fognarie, delle reti idriche, del gas, dell'elettricità, delle linee telefoniche, etc., devono essere informate sulla tipologia del manufatto da realizzare, sull'estensione dell'area coinvolta e sulla tempistica dei lavori. Ogni gestore dovrà ricevere una documentazione costituita dalla corografia del bacino tributario con l'esatta posizione del sito e le planimetrie che indichino le diverse fasi in cui si articola la costruzione dell'opera e le aree coinvolte. Insieme alla documentazione realizzata in fase di progetto verranno studiate soluzioni alternative per lo spostamento dei servizi interferenti e ostacolanti la costruzione dell'opera. Un accordo tra progettista del manufatto e gestori dei servizi chiarirà in merito al tracciamento di percorsi alternativi o l'individuazione dei lavori da compiere per proteggere i servizi presenti in sito. Non ricevendo adeguate informazioni prima della data di inizio dei lavori i gestori potranno richiedere di ispezionare il sito e di essere informati su metodologie e tempistiche di realizzazione.

Nel caso in cui la presenza di un'infrastruttura o di un sottoservizio influenzi la realizzazione dell'opera o il suo utilizzo, si dovrà provvedere a una variazione di tracciato, deviandolo esternamente all'area di invaso. Il nuovo tracciato e i dettagli dell'intervento devono essere concordati prima dell'avvio dei lavori ed eseguiti prima della costruzione del manufatto principale. I lavori di deviazione verranno eseguiti direttamente dall'impresa sotto la sorveglianza e la direzione del gestore del servizio, oppure dal gestore stesso dietro pagamento delle opere realizzate.

4.3 Movimentazione del terreno

4.3.1 Considerazioni generali

Andranno effettuati i seguenti lavori di movimento terra:

- opere temporanee (per la fase esecutiva) di regimazione dell'acqua di ruscellamento superficiale e dell'acqua di falda;
- preparazione del sito
 - splateamento e scoticamento nelle aree di prestito e nelle aree di fondazione del rilevato, con rimozione della vegetazione e delle strutture preesistenti non recuperabili e del terreno agricolo di superficie;
 - rimozione della vegetazione e delle strutture presenti in sito che rientrano nell'area di invaso del bacino;
 - rimozione del materiale di fondazione con caratteristiche non adatte. Potrà essere utilizzato successivamente per il riempimento delle cave di prestito durante la fase di recupero del sito.
- preparazione del terreno di fondazione nell'area del rilevato;
- introduzione delle misure di controllo della filtrazione;
- selezione e scavo del terreno nelle aree di prestito;
- trasporto del terreno;
- posa e compattazione;
- posa del materiale scoticato inizialmente;
- costruzione dei sistemi di drenaggio permanenti;
- lavori di protezione e sistemazione;
- recupero dell'area con ripristino dei danni causati a suoli e vegetazione;
- esecuzione di lavori di riprofilatura lungo il perimetro dell'invaso.

I lavori di recupero, trasporto e posa del terreno con cui verrà realizzato il manufatto dovranno avvenire eseguendo gli scavi in modo controllato ed effettuando una posa accurata del materiale recuperato. Tali lavori non vanno considerati come un insieme di operazioni grossolane di rimozione e di posa del terreno. E' importante che la metodologia di lavoro sviluppata sia svolta in modo sequenziale, prestando molta attenzione ai cambiamenti delle condizioni al contorno, adattando la modalità di posa del terreno a variazioni delle sue caratteristiche e alle condizioni climatiche.

4.3.2 Controllo dell'acqua di ruscellamento e dell'acqua di falda

Vanno intraprese misure volte ad evitare che durante la fase costruttiva l'acqua di ruscellamento superficiale scorra liberamente lungo il rilevato e all'interno dell'area di prestito del materiale formando pericolosi solchi e fossati.

Le condizioni di falda hanno un peso importante nella definizione delle modalità di scavo e nell'eventualità non si disponga di precise informazioni al riguardo è consigliato assumere ipotesi cautelative. Se, ad esempio, il sito si trova a fondo valle, è possibile che il livello piezometrico coincida con il piano campagna o sia addirittura più alto.

L'aggottamento di falda si attua mediante un impianto di pompaggio dimensionato per garantire che il livello piezometrico raggiunga una profondità inferiore rispetto a quella di fondo scavo, mantenendo l'area di lavoro asciutta. L'impianto utilizzato deve garantire anche il sollevamento di venute d'acqua improvvise e impreviste e deve essere protetto da possibili atti vandalici e dall'insorgere di problemi meccanici.

Durante la costruzione di un'opera di sbarramento in alveo si deve provvedere al controllo e alla deviazione del corso d'acqua principale. Si può operare nei seguenti modi:

- convogliando le acque in un condotto di dimensioni adatte posato nel terreno originario. Un argine di contenimento dovrà separare l'area di lavoro dall'ingresso della tubazione di deviazione;
- costruendo un argine di contenimento sufficientemente alto da raccogliere tutte le portate del corso d'acqua principale. E' una metodologia adeguata solo a basse portate e non può essere utilizzata per la costruzione di una diga soggetta a un grande flusso d'acqua;
- facendo passare la portata in un canale già esistente o in un canale di deviazione e procedendo alla costruzione del rilevato sul lato opposto. La deviazione del flusso avviene mediante un argine di contenimento. Questo metodo è raccomandato solo per le dighe più piccole e non facilita la gestione dei flussi di piena;
- costruendo un canale scaricatore che convogli il flusso durante la fase costruttiva, ma che sia in grado di contenere la portata di piena di progetto anche durante la gestione del bacino. Il progetto della sistemazione della struttura di deviazione/sfioro necessita di attente considerazioni e specifici suggerimenti.

Fra tutte le soluzioni proposte la prima è la più soddisfacente e di sicura realizzazione, nonché la più economica nel caso in cui la condotta di deviazione possa fungere successivamente da scarico di fondo dello sbarramento.

Le piccole arginature di contenimento sono solitamente realizzate con sacchi di sabbia o simili, ma anche con materiale di riporto o il terreno superficiale di scoticamento recuperato durante la preparazione del sito. L'arginatura deve essere alta abbastanza da permettere che la portata massima del corso d'acqua fluisca in sicurezza all'interno della condotta di deviazione. L'altezza può essere ridotta utilizzando due grandi condotte. Tutte le condotte devono essere installate correttamente, cercando di minimizzare il potenziale flusso di filtrazione che potrebbe svilupparsi nella zona di contatto tubazione/terreno.

Il lavoro va effettuato garantendo che lo scarico del condotto o del canale di deviazione si immetta nel corso d'acqua a valle dello sbarramento e che il flusso di scarico non generi erosione delle sponde per le quali, se necessario, si provvederà alla realizzazione di opportune protezioni per mezzo di scogliere o massicciate. Le condotte di deviazione del corso d'acqua devono essere provviste di collare antifiltrazione.

4.3.3 Macchinari utilizzati

Il terreno utilizzato nella costruzione del manufatto viene trasportato dalle aree di prestito all'area in cui sorgerà lo sbarramento e qui compattato. Le modalità da adottare per le fasi di scavo, trasporto e compattazione del materiale devono tener conto:

- del tempo disponibile per l'esecuzione dei lavori;
- della distanza di trasporto;
- del tipo di terreno e delle sue condizioni naturali;
- delle previsioni meteorologiche;
- della variazione delle proprietà del terreno in relazione alle condizioni meteorologiche.

La tipologia dei macchinari da costruzione da utilizzare dipende da vari fattori, fra i quali:

- la tipologia del rilevato da costruire;
- la dimensione del manufatto;
- le caratteristiche del terreno impiegato per la costruzione;
- la distanza fra le aree di prestito e l'area di costruzione del rilevato;
- le tempistiche di realizzazione;
- la complessità della costruzione, strutture speciali, condotte, etc.;
- la previsione delle condizioni meteorologiche.

I macchinari disponibili per le operazioni di scavo, trasporto, posa e costipamento del terreno sono elencati in Tabella 4.2 e Tabella 4.3.

Tabella 4.2. Escavatori e mezzi di trasporto

Scopo	Macchinario tipico	Dettagli
Macchinari di scavo	Retroescavatori idraulici	Normalmente cingolati, ma possono anche essere gommati. Macchinario altamente flessibile. Disponibile facilmente a noleggio.
	Escavatori a pala frontali	Meno flessibile nell'uso. Normalmente cingolati.
	Caricatore cingolato (dozer)	Uso limitato nello scavo, ma adatti al caricamento del materiale.
	Caricatore gommato (dozer)	
Macchinari di trasporto	Trattori e veicoli da trasporto con rimorchio	Disponibili in molte aziende agricole, questi macchinari sono molto versatili nell'uso.
	Piccoli dumper	Manovrabili e possono spesso scaricare in diverse direzioni.
	Camion	Possono essere articolati e retro-scaricatori. Sono normalmente utilizzati in grandi progetti.
Macchinari di scavo e trasporto	Ruspe standard gommate su trattore	Possono essere rimorchiate dietro un bulldozer. Usate solo per velocizzare i lavori o se la distanza di trasporto del materiale è breve.
	Ruspe motorizzate	Ruspa con il sistema di guida. Non sufficiente nei grandi lavori.
Macchinari di dozing e posa	Dozer cingolati e dozer gommati	Utilizzati per cospargere e posare il materiale. Solo con pala, no benna frontale. Normalmente usati per rimorchiare il macchinario per eseguire la compattazione.
	Caricatori cingolati (drot)	Spesso utilizzati come macchina per cospargere e distendere il materiale e per compattarlo.

NOTA: La macchina cingolata è quella che normalmente viene utilizzata e può essere adatta anche nelle condizioni di terreno secche. Quella cingolata è generalmente più lenta rispetto a quella gommata, ma è maggiormente manovrabile.

4.3.4 Preparazione del sito

In questa fase l'intera area del bacino di invaso deve essere sgomberata da tutte quelle strutture che includono recinzioni, costruzioni, sistemi di drenaggio preesistenti, strade, cordoli stradali, etc. Nel caso in cui si rinvenissero resti archeologici, il lavoro deve cessare immediatamente e si deve avvisare l'autorità competente. Il periodo di interruzione dei lavori dipenderà dal periodo richiesto per i lavori di indagine e di recupero dei resti archeologici.

Sia nell'area destinata ad accogliere la fondazione del manufatto che nelle aree di prestito deve essere rimossa l'intera vegetazione (alberi, boscaglia, radici) e ogni altro materiale organico. Nell'area di invaso tale operazione va estesa fino al raggiungimento della quota di massimo invaso prevista.

Il terreno superficiale deve essere scoticato e accumulato temporaneamente in un sito adatto. Lo strato di interfaccia fra il terreno di fondazione e il terreno costituente il rilevato è un'area molto critica sia per il controllo della stabilità, che per il controllo della filtrazione. La preparazione della fondazione prevede la rimozione di tutti i materiali soffici, sciolti e non adatti a sopportare il carico che verrà trasmesso dalla costruzione dello sbarramento.

Prima della stesa del materiale costituente il rilevato, il terreno di fondazione andrà arato lungo l'allineamento dello sbarramento, creando così una buona superficie di contatto fra la fondazione e il terreno di riporto del rilevato. Ciò garantisce migliori condizioni di stabilità e riduce i rischi di filtrazione.

4.3.5 Aree di prestito

Tra gli obiettivi della campagna di indagini in sito, vi è la raccolta delle informazioni necessarie alla localizzazione delle aree di prestito, definendo l'estensione e lo spessore degli strati di terreno idonei alla costruzione e le metodologie di coltivazione. Qualora sia necessario procedere allo scavo di materiale non idoneo alla costruzione, si provvederà allo stoccaggio e al suo impiego nelle operazioni finali di recupero dell'area.

Nel caso in cui sia necessario approfondire lo scavo delle aree di prestito al di sotto del livello della superficie freatica, per evitare che il materiale sia troppo rammollito a causa dell'elevato contenuto d'acqua, occorre aggottare la falda al di sotto della massima quota di scavo e drenare l'intera area di scavo. Il sistema di drenaggio più semplice è quello superficiale, costituito da trincee o canalette realizzate ad una quota inferiore alla massima quota di scavo e che perimetrano l'area

da drenare convogliando l'acqua a un bacino di pompaggio, dove viene rimossa o per sollevamento o, se possibile, per gravità.

Conclusi i lavori di recupero del terreno necessario alla costruzione dello sbarramento tutto il materiale non utilizzato perché in eccesso o non adatto verrà impiegato per eseguire la rifinitura delle sponde e diminuire l'inclinazione nelle aree di scavo.

4.3.6 Costruzione del rilevato

La costruzione del rilevato deve avvenire rapidamente per evitare che il terreno di fondazione precedentemente preparato si degradi o danneggi. Il rilevato deve essere costruito per strati di spessore uniforme stesi longitudinalmente e compattati per l'intera lunghezza, seguendo un processo continuo e limitando al minimo indispensabile la presenza di vie di accesso laterali. Ciò scongiura il rischio che si creino discontinuità, che potrebbero provocare cedimenti differenziali e la formazione di zone di debolezza e di potenziale filtrazione. Nei punti in cui sono state lasciate aperture nel rilevato, queste devono essere richiuse prontamente rimuovendo eventuale materiale essiccato e assicurando un buon collegamento con il materiale posato precedentemente.

Il rilevato viene costruito eseguendo la posa sequenziale del materiale e formando strati con una inclinazione superficiale pari a 1:20 per permettere che l'acqua di ruscellamento superficiale scorra via. Al termine di ogni giornata lavorativa e ogni qualvolta si prevede che possa verificarsi un evento di precipitazione, lo strato di materiale deve venire rullato per evitare che si formino pozze d'acqua nei solchi e nelle fosse lasciate dai mezzi meccanici e per incoraggiarne il drenaggio.

Prima che venga effettuata la posa di un ulteriore strato di materiale, quello presente in sito deve essere lavorato preventivamente con erpici o scarificatori per permettere che legghi con quello posato successivamente.

Gli strati di materiale terroso non devono mai essere posati su acqua stagnante o su acqua di ruscellamento per evitare che il materiale divenga troppo soffice. Pertanto le operazioni di stesa vanno interrotte durante e dopo intense precipitazioni. Prima di una loro ripresa occorre lasciare essiccare il materiale più rammollito o eventualmente rimuoverlo. Le operazioni devono essere interrotte anche nel caso in cui il materiale da posare o di fondo risultino congelati.

4.3.7 Compattazione del terreno

Per un'adeguata compattazione del terreno occorre prendere in considerazione i seguenti aspetti:

- contenuto d'acqua naturale del terreno;
- tipologia di macchinario utilizzato (caratteristiche, peso e pressione di contatto);
- spessore dei piani soggetti a compattazione (normalmente limitato a un valore massimo di 200 mm);
- numero di passate del rullo (normalmente non inferiori a 4);
- velocità di passata del rullo.

Le tecniche di compattazione dei terreni sono essenzialmente a seconda della natura del terreno: sola rullatura per terreni coesivi, vibrazione associata alla rollatura nel caso di materiali incoerenti. Le attrezzature più comunemente utilizzate sono elencate in Tabella 4.3.

Tabella 4.3. Macchinari per la costipazione del materiale utilizzati nella costruzione di piccoli invasi

Macchinari costipatori	Caratteristiche	Uso tipico
Rullo a cilindro liscio	Molto versatile e normalmente usato nella costruzione di piccole dighe. Quando è disponibile il sistema di vibrazione viene usato solo su terreno granulare.	Tutte le zone e tutti i materiali, eccetto quelli coesivi molto soffici.
Rulli a rete	Più efficienti su suolo coesivo secco, su materiali granulari ben graduati. Agiscono similmente ai rulli costipatori a piede di montone utilizzando una rete di acciaio invece delle protuberanze.	Materiale coesivo di spalla.
Rulli costipatori a piede di montone	Hanno una fila regolare di protuberanze per poter impastare insieme il terreno. Maggiormente adatti su suolo soffice coesivo quando utilizzati insieme alla lama del dozer per mescolare e miscelare il suolo, specialmente se viene aggiunta dell'acqua. Piani coesivi costipati.	Nucleo impermeabile e taglione. Manufatto omogeneo. Materiale coesivo di spalla a meno che non sia molto rigido e secco.

Manuale per gli sbarramenti di competenza regionale

Macchinari costipatori	Caratteristiche	Uso tipico
Rulli pneumatici	Adatti per suoli coesivi soffici o per materiale granulare ben graduato. Meno adatti nell'assistere il miscelamento e mescolamento dei terreni.	Nucleo impermeabile e taglione. Manufatto omogeneo. Materiale di spalla a meno che non sia materiale coesivo rigido o materiale granulare solido.
Rulli lisci con vibrante	Usati per terreni granulari, sia ben graduati, sia uniformi. Efficienti nel ridurre i vuoti e costipare in profondità negli strati precedentemente posati. Il rullo viene inizialmente utilizzato senza vibratore per evitare che il rullo penetri nel materiale sciolto.	Tutti i materiali granulari, nei materiali coesivi si ha un piccolo beneficio con vibrazione a meno che non sia molto rigido e secco.
Rulli con guida manuale e vibrazione automatica	Versione più piccola dei rulli con vibratore. Può avere due rulli in coppia. Il rullo può venire inizialmente utilizzato senza vibrazione per raggiungere la costipazione ed evitare che il rullo penetri nel materiale sciolto.	Materiale nelle aree ristrette e nelle zone adiacenti alle strutture, condotte, etc.
Costipatore con piatto vibrante	Macchina manuale usata per la costipazione in piccole aree con materiale granulare, specialmente nelle trincee.	Costipazione di materiale in aree localizzate immediatamente adiacenti a strutture, condotte, etc. Non adatto per terreni coesivi.
Pestello, massa battente	Macchina manuale usata per la costipazione in piccole aree con materiale coesivo, specialmente nelle trincee.	Costipazione di materiale in aree localizzate immediatamente adiacenti a strutture, condotte, etc. Non adatto per suolo granulare.

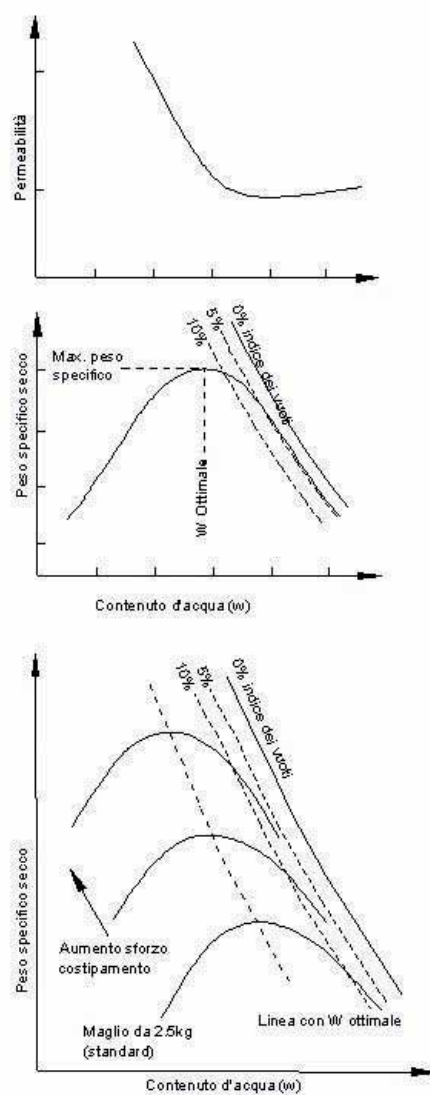
NOTA: Le macchine utilizzate per un lavoro ampio possono essere automatizzate o rimorchiate da dozer.
Le macchine automatizzate sono limitate ai progetti più ampi, mentre le tipologie di manufatto più piccole vengono generalmente costruite utilizzando i rulli lisci spinti da un dozer adatto.

Nel caso dei terreni coesivi i macchinari di compattazione generalmente impiegati variano da semplici rulli lisci trainati da un dozer ai rulli costipatori a piede di montone, costituiti da una serie di protuberanze applicate sulla superficie del tamburo. Nel caso dei terreni incoerenti si impiegano rulli costipatori muniti di dispositivi di vibrazione.

In prossimità di strutture ausiliarie realizzate all'interno del corpo del rilevato, la compattazione deve essere realizzata con grande attenzione, per garantire un risultato quanto più possibile omogeneo in ogni parte del manufatto ed evitare lo sviluppo di futuri cedimenti differenziali. In genere viene sconsigliato l'utilizzo di macchinari pesanti, è invece preferibile l'utilizzo di attrezzature manuali.

Fissato lo spessore dello strato da compattare e definita la natura del terreno (ovvero la sua curva granulometrica), l'efficacia delle operazioni di compattazione dipende essenzialmente da due fattori: l'energia di compattazione (ossia dalla scelta del macchinario e delle sue caratteristiche) e dal contenuto d'acqua del terreno. Quest'ultimo aspetto riveste una particolare importanza e merita dunque un attento controllo.

La Figura 4.1 illustra i risultati della Prova Proctor, una prova di laboratorio standardizzata introdotta dall' US Army Corps of Engineers per definire il valore ottimale del contenuto d'acqua di un terreno da costipare in relazione ad un preciso livello di energia di costipamento.



Nota: Tutte le unità sono in percentuale, eccetto il peso in volume secco (kg/m^3) e la permeabilità (m/s). Le linee dei vuoti occupati dall'aria rappresentano teoricamente la quantità di aria all'interno del materiale ed il costipamento dovrebbe cercare di ridurre tale valore sotto il 10%.

Figura 4.1 Relazione fra contenuto d'acqua, densità secca, costipamento e permeabilità

Per un determinata tecnica di compattazione esiste un valore ottimale del contenuto d'acqua del terreno, cui corrisponde un valore massimo della densità raggiungibile (il picco della curva), mentre al variare dell'energia di compattazione variano sia il valore di contenuto d'acqua ottimale, sia la massima densità ottenuta.

E' evidente quindi l'importanza di un attento e scrupoloso controllo del contenuto d'acqua del terreno impiegato nella costruzione del rilevato con riferimento alle tecniche di compattazione prescelte. Alcune indicazioni generali sono riportate in Tabella 4.4 e Tabella 4.5.

Se il materiale nello stato naturale non possiede l'umidità richiesta questa può entro certi limiti essere ridotta o incrementata nella maniera indicata al punto 4.3.5.

Tabella 4.4. Valori tipici del contenuto d'acqua ottimale per alcune tipologie di terreno

Tipologia di suolo	Contenuto d'acqua naturale ottimale
Argilla	15 – 20 %
Argilla limosa	12 – 15 %
Argilla sabbiosa	10 – 12 %
Sabbia	7 – 10 %
Sabbia ghiaiosa	5 – 8 %

Tabella 4.5. Alcune indicazioni sulla compattazione del terreno

Tipologia di macchinario costipatore	Categoria	Massimo spessore strati [mm]	Minimo numero di passate	Tipologie di suolo
Rullo liscio (o rullo con vibratore che opera senza) Peso per metro di ampiezza del rullo:	fra 2100 kg e 2700 kg	125	8	Coesivo o granulare
	fra 2700 kg e 5400 kg	125	6	
	più di 5400 kg	150	4	
Rullo a griglia Peso per metro di ampiezza del rullo:	fra 2700 kg e 5400 kg	150	10	Coesivo più rigido o granulare
	fra 5400 kg e 8000 kg	150	8	
	più di 8000 kg	150	4	
Rullo con uncini Peso per metro di ampiezza del rullo:	più di 4000 kg	150	4	
Rullo pneumatico Massa per ruota:	fra 1000 kg e 1500 kg	125	6	Coesivo più soffice o granulare
	fra 1500 kg e 2000 kg	150	5	
	fra 2000 kg e 2500 kg	175	4	
	più di 2500 kg	200	4	
Rullo liscio con vibratore Peso per metro di ampiezza del rullo:	meno di 700 kg	100	Non adatto	granulare
	fra 700 kg e 1300 kg	125	12	
	fra 1300 kg e 1800 kg	150	8	
	fra 1800 kg e 2300 kg	175	4	
	più di 2300 kg	200	4	

NOTA: Il rullo con uncini è normalmente utilizzato su terreno coesivo relativamente soffice, trainato da un dozer e con aggiunta di acqua.

4.4 Misure di controllo della filtrazione

4.4.1 Taglione

L'approfondimento finale della trincea costituente il taglione di fondazione verrà determinata in sito durante la fase costruttiva e dipenderà dalle condizioni stratigrafiche che si incontrano durante lo scavo. Tale scavo deve terminare all'interno di uno strato argilloso di buona qualità o in uno strato di roccia compatta: in caso contrario la profondità di infissione del taglione va definita sulla base di un'analisi di filtrazione. E' essenziale soddisfare tale condizione adeguatamente durante la fase costruttiva per prevenire che successivamente si sviluppi filtrazione eccessiva attraverso il terreno di fondazione. Qualsiasi sistema di drenaggio preesistente in sito e intercettato durante la fase di scavo deve essere eliminato, riempiendo il primo metro di trincea con conglomerato cementizio. Nel caso in cui si verificano evidenti perdite di materiale all'interno del sistema drenante esistente e dovessero venire rimosse grandi lunghezze di condotti, le loro estremità andranno sigillate con c.l.s. e le parti rimosse rimpiazzate con argilla di buona qualità. Quando si incontrano dei sistemi di drenaggio preesistenti è necessario che lo scarico venga deviato in aree distanti dal rilevato e non all'interno del sistema di drenaggio del rilevato stesso.

Durante la realizzazione del taglione si deve provvedere alla regimazione delle acque accumulate all'interno dello scavo. Il taglione è parte integrante della costruzione del rilevato, per cui il materiale impiegato deve avere le stesse caratteristiche di quello previsto per la costruzione del rilevato.

4.4.2 Rivestimento in argilla del rilevato lato monte

Un metodo alternativo per il controllo della filtrazione attraverso il corpo del rilevato è rappresentato dall'introduzione a lato monte di un rivestimento in argilla. L'argilla da utilizzare nella realizzazione del rivestimento di monte del paramento deve essere simile a quella utilizzata per il nucleo centrale del rilevato. La posa e la compattazione di tale strato deve avvenire con le stesse accortezze adottate per il paramento. Al termine, il rivestimento in argilla viene ricoperto da uno strato di materiale granulare di protezione.

4.5 Drenaggio

Il sistema di drenaggio in uno sbarramento assolve al compito di allontanare l'acqua che, nonostante l'impermeabilizzazione, filtrando in quantità eccessiva attraverso l'opera e le sue fondazioni può comprometterne stabilità e buon funzionamento.

4.5.1 Trincee di drenaggio

I dreni al piede del rilevato devono essere realizzati con allineamento rettilineo o al più con percorsi ad ampio raggio di curvatura; gli scavi devono essere eseguiti così da arrecare il minimo disturbo al terreno circostante. La Figura 4.2 mostra un canale di drenaggio eseguito al piede del rilevato e rivestito con geotessuto; all'interno è posta una condotta flessibile per la raccolta e allontanamento delle acque, che a sua volta è ricoperta con materiale granulare molto permeabile.

E' bene prendere tutte le dovute precauzioni per evitare che il sistema di drenaggio venga danneggiato o contaminato dai passaggi delle macchine operatrici. Eventuali sezioni danneggiate devono essere ricostruite.

Qualora si osservino perdite nel sistema di impermeabilizzazione non legate a eventi meteorici precisi (temporali), sarà necessario ricercarne le cause (legate ad es. a cattiva impermeabilizzazione dell'opera o filtrazione localizzata nella fondazione), poiché potrebbero comportare il cattivo funzionamento dell'opera o la sua rottura.

I terreni utilizzati nel realizzare un sistema di drenaggio efficiente devono essere compatibili con la funzione che devono svolgere. I dreni vanno costruiti così da assicurare nel tempo la filtrazione di quantità d'acqua sufficienti, evitando intasamenti che ne ridurrebbero l'efficienza. I dettagli sulle varie tipologie di condotti drenanti sono indicati in Tabella 4.5. All'interno della trincea di drenaggio vanno posizionati tubazioni fessurate, terreno a elevata permeabilità e geotessuto, così che il flusso dell'acqua sia diretto verso la tubazione porosa senza dilavamento delle particelle più fini del terreno e conseguente perdita di funzionalità del sistema drenante.

Generalmente i materiali permeabili di ricoprimento utilizzati sono ghiaia lavata e spaccato di roccia, ma possono essere utilizzate anche scorie di fornace, clinker o materiali sferici derivanti dalla cenere polverizzata del combustibile, salvo incompatibilità con l'uso previsto per il bacino di invaso. Il terreno utilizzato nei sistemi di drenaggio deve anche soddisfare le caratteristiche descritte in Tabella 3.5, affinché mantenga la sua efficacia nel tempo e sia compatibile con la tipologia di tubazione utilizzata.

Per evitare che possibili cedimenti del terreno (successivi alla costruzione dell'opera) causino danni al sistema di drenaggio, è opportuno assicurare una buona flessibilità alle tubazioni in ingresso e in uscita utilizzando i dispositivi di giunzione illustrati in Figura 4.3.

Tabella 4.5. Caratteristiche dei condotti di drenaggio

Condotti di drenaggio	
•Dreni in plastica perforati o fessurati	Costruiti generalmente in PVC, materiale vantaggioso perché leggero. Costituiti da spirali flessibili (o rigide) in PVC mantenuti insieme da una struttura di base sempre in PVC. Generalmente le tubazioni hanno dimensioni comprese tra 60 e 350 mm. Possono essere utilizzate per il drenaggio superficiale e nei sistemi di drenaggio sotterraneo quando il carico sulla tubazione è basso: l'uso ad una profondità superiore ai 2 m dal piano finito di riempimento o dal piano campagna deve essere valutato attentamente.
•Condotti porosi in C.A.	generalmente costruiti in cemento Portland ordinario (OPC). Nei casi in cui il terreno sia aggressivo, possono essere costruiti utilizzando cemento resistente ai solfati.

4.5.2 Pozzetti di ispezione

Nei punti in cui le condotte drenanti cambiano direzione o si intersecano, conviene installare dei pozzetti per l'ispezione periodica delle canalette o in occasione di fenomeni di intasamento. Lo schema costruttivo di uno di questi pozzetti è riportato in Figura 4.3.

4.5.3 Sistemi di drenaggio associati alle strutture

E' necessario prevedere un sistema di drenaggio in prossimità delle strutture ausiliarie inserite all'interno del corpo diga, così da prevenire in tali punti l'insorgere di sottopressioni. Si deve quindi provvedere alla posa di un sufficiente spessore di materiale drenante lungo il perimetro di tali strutture e alla realizzazione di adeguati dispositivi di scarico. Per la raccolta dell'acqua di ruscellamento superficiale in prossimità di tali strutture conviene predisporre sistemi di drenaggio indipendenti.

I sistemi di drenaggio attraverso il corpo diga devono essere realizzati con estrema accortezza, per evitare che inneschino percorsi di filtrazione indesiderati che provocherebbero pericolosi fenomeni di erosione e deterioramento dello sbarramento. Questo requisito può essere prontamente soddisfatto assicurando che la porzione centrale di qualsiasi struttura che attraversa il rilevato sia circondata da materiale argilloso, molto bene compattato e che il drenaggio sia previsto solo nella sezione di valle dello sbarramento o nella parte esterna al corpo diga.

4.5.4 Manufatto di scarico

Per tutti i sistemi di drenaggio che scaricano all'interno del corso d'acqua principale deve essere predisposto un manufatto di scarico allo scopo di facilitare la manutenzione e il monitoraggio delle portate scaricate dal dreno. Si possono utilizzare manufatti prefabbricati oppure costruirli in opera in semplice muratura o in conglomerato cementizio armato. Come per i pozzetti di ispezione, anche per i manufatti di scarico si deve provvedere a un collegamento flessibile.

4.5.5 Geotessuti

Per i geotessuti è importante una corretta posa in opera e un'adeguata protezione nei confronti dei fattori che possono provocarne il danneggiamento, quali:

- lunga esposizione alla luce del sole;
- danni meccanici e strappi.

Per una disamina di problematiche connesse all'utilizzo dei geotessuti si rimanda al paragrafo 3.3.10.

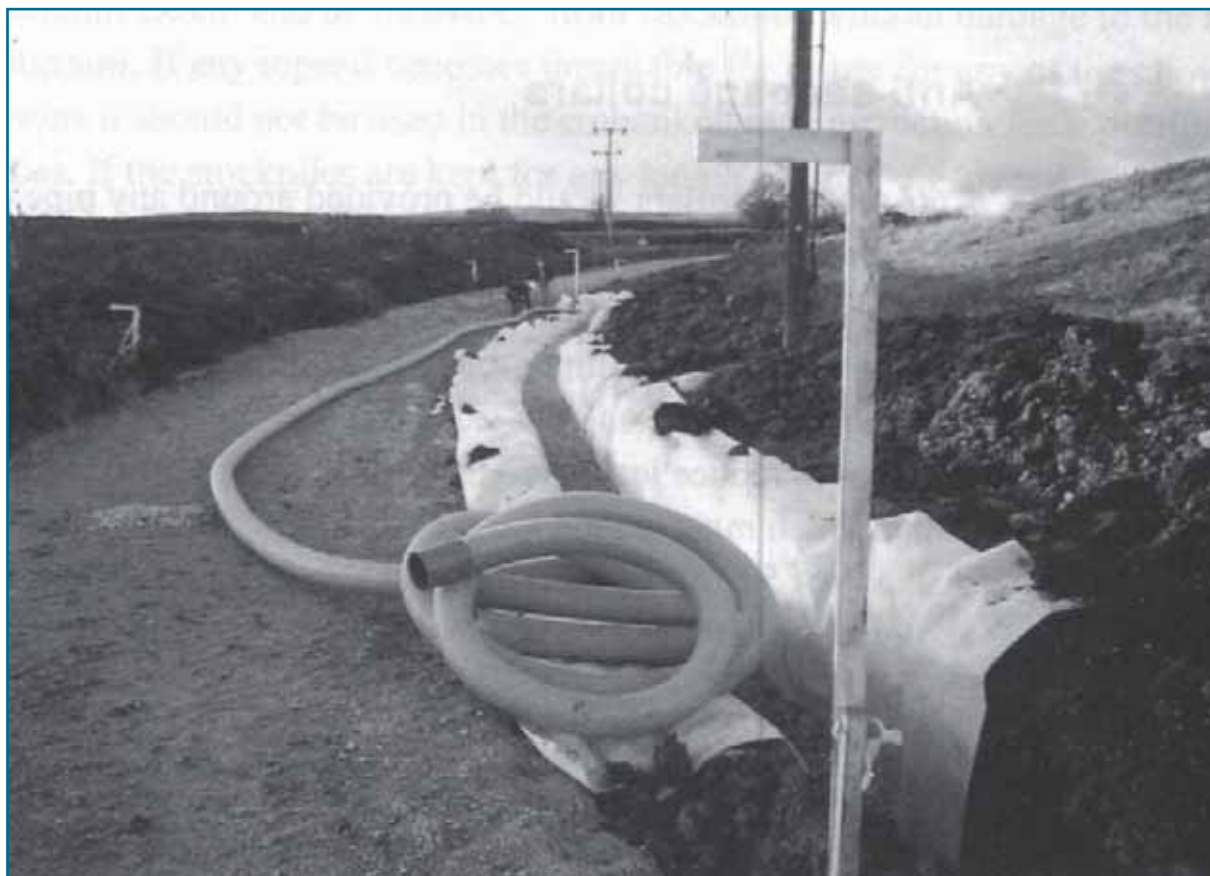
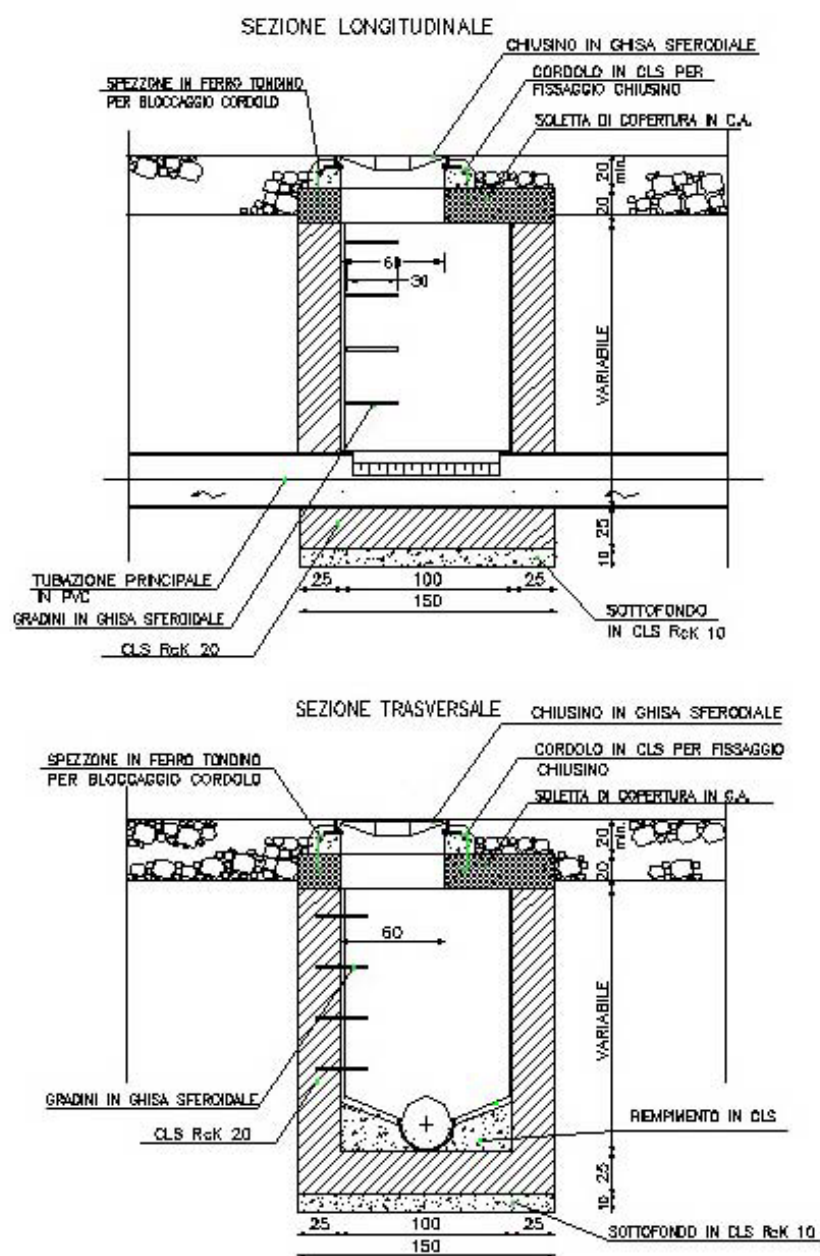


Figura 4.2. Costruzione di un dreno al piede del rilevato



Nota: Possono essere utilizzati, per camere d'ispezione profonde, anelli in ds prefabbricati o a sezione rettangolare con soletta di copertura.

Figura 4.3 Pozzetto d'ispezione del sistema di drenaggio

BIBLIOGRAFIA

A.G.I 1977, Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche

Arredi F., Costruzioni idrauliche, UTET, Torino, 1977

Associazione Idrotecnica Italiana, Le crisi idriche in Italia: necessità di nuovi serbatoi, A.I.I., Roma, 1991

Autorità di Bacino del Fiume Po, Distribuzione spaziale delle precipitazioni intense, Parma, 2001

Autorità di Bacino del Fiume Po, Metodo di delimitazione delle fasce fluviali, Parma, 1987

Bellincioni G., Il Progetto e la Costruzione dei Laghetti Artificiali Agricoli e per la Provvista di Acqua Potabile, 3 ed., Lavagnolo, Torino, 1948

Benini G., Sistemazioni idraulico forestali, UTET, Torino, 1990

Brisi C. & Lucco Borlera M., Lezioni di Tecnologia dei materiali e Chimica applicata, Levrotto e Bella, Torino, 1976

British Standards Institution, Code of Practice for Earthworks, BS 6031, 1981

British Standards Institution, Code of Practice for Foundations, Longman Scientific and Technical, 5 ed., Harlow, 1986

British Standards Institution, Code of Practice for Site Investigation, 1981

Butera L., Definizione di asta montana in relazione al trasporto solido, Problemi della montagna, Milano, 1981

Butera L. & Sordo S., Curve di possibilità climatica di tipo probabilistico per piogge di durata inferiore al giorno relativamente al Piemonte e alla Valle d'Aosta, XXI Convegno di Idraulica, L'Aquila, 1989

Butera L. & Sordo S., Sul legame che intercorre tra le caratteristiche geometriche ed idrauliche di un corso d'acqua a fondo mobile, Università di Padova, 1986

CEMAGREF, Guide pour le Diagnostic Rapid des Barrages Anciens, Direction de l'Espace Rural et de la Foret, Paris; Groupment Aix-en-Provence, Aix-en-Provence, 1992

Chec S., Washout of spillway dams, Channels and channel control structures, 1st International Conference, Southampton, 1984

Citrini D. & Nosedà G., Idraulica, Casa Ambrosiana, Milano, 1987

Claps P. & Siccardi F., Mediterranean Storms, BIOS, Cosenza, 1999

Collepari M., Scienza e tecnologia del calcestruzzo, Hoepli, Milano, 1980

Comité Français des Grandes Barrage, Petits Barrages: Recommandations pour la Conception, la Réalisation et le Suivi, Paris 1997

Compston D.G. et Al., Design and Construction of Buried Thin-Wall Pipes, CIRIA Report 78, 1978

Contessini F., Dighe e Traverse: progetto e costruzione, Tamburini, Milano, 1953

Contessini F., Impianti idroelettrici, Tamburini, Milano, 1956

D.M. dei lavori pubblici 11 marzo 1988 (Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Istruzioni per l'applicazione.)

Datei C., Introduzione allo studio delle dighe – Sbarramenti in muratura, Cortina, Padova, 1976

De Marchi G., Sull'onda di piena che seguirebbe al crollo della diga di Cancano, L'Energia Elettrica, 1945

Departement of the army, Design and Construction of Levees, Office of the chief of engineers, Washington, 1978

Di Berardino P., Sbarramenti, Manuale Cremonese, 1998

Elia E., Individuazione dell'idrogramma di piena conseguente a dam-break (Tesi di laurea) Politecnico di Torino, DITIC, Torino, 1994

Fell R. et Al., Geotechnical Engineering of Embankment Dams, Balkema

Ferro V., La sistemazione dei bacini idrografici, McGraw-Hill, Milano, 2002

Giuseppetti G. et Al., Analisi sulle possibili dinamiche di rottura delle dighe di ritenuta in materiale sciolto, Enel Cris, Milano, 1991

Hoskins C.G., Embankment Dams, Vegetation and Engineers, Dams and Reservoirs Vol 3, N°3, BDS, 1993

Kraatz D. et Al., Small hydraulic structures, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 1975

Lancellotta R. & Calavera J., Fondazioni, 1 ed., Mc Graw-Hill, Milano, 1999

Lancellotta R., Geotecnica, 3 ed., Zanichelli, Bologna, 2004

Lopardo R. et Al., La phase initiale de ropture des barrages fusibles et son étude sur modele hydraulique, XX IAHR Congress, Moscow, 1983

Maione U. & Moisello U., Appunti di idrologia, La Goliardica Pavese, Pavia, 1981

Ministero LL.PP., Norme tecniche per la progettazione e le dighe di sbarramento, 1982

Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 3274 del 20 marzo 2003 - Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica

Post G. & Londe P., Les barrages en terre compactée, Gauthier-Villars, Paris, 1953

Regione Piemonte, Interventi di sistemazione del territorio con tecniche di Ingegneria Naturalistica, Torino, 2003

Royet P., La Surveilland et l'Entrtien des Petits Barrages, Guide Pratique, Ministère de l'Environnement. Direction de l'Eau, Paris; CEMAGREF-Groupement d'Aix –en – Provence, Aix en Provencem, 1995

Schiechl H.M., Bioingegneria forestale - Biotecnica naturalistica, Castaldi, Feltre (BL), 1991

Scimemi E., Compendio di idraulica, Cedam, Padova, 1964

Sowers G.F., Earth and Rockfill Dam Engineering, Asia Publishing House, New York, 1962

Tavenas F. et Al., The permeability of natural soft clays, Part 1: Methods of laboratory measurement, Canadian Geotechnical Journal 20, N°4, 1983

Telford T., Floods and Reservoir Safety: an Engineering Guide, 2 ed., The institution of civil engineers, London, 1989

Tomlinson M.J., Foundation Design and Construction, Longman Scientific and Technical, 5 ed, Harlow, 1986

Unites States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Design of Small Dams, 3 ed, Hsai-yang Fang, New York, 1987

Weltman A.J. & Head J.M., Site Investigation Manual, CIRIA Special Publication, 1983

Wilson S.D. & Marsal R.J., Current Trends in Design and Construction of Embankment Dams, ASCE, New York, 1979