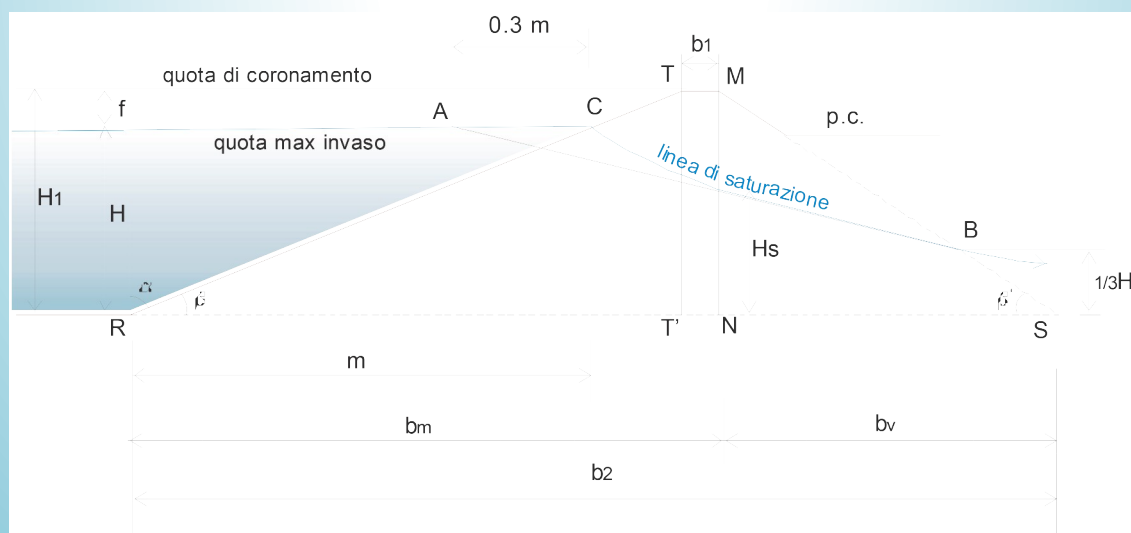




REGIONE SICILIANA
ASSESSORATO INFRASTRUTTURE E MOBILITA'
DIPARTIMENTO REGIONALE TECNICO

LINEE GUIDA
PER LA REALIZZAZIONE E L'ADEGUAMENTO
DI LAGHETTI COLLINARI ED INVASI



Versione 2024

**REGIONE SICILIANA
ASSESSORATO INFRASTRUTTURE E MOBILITA'
DIPARTIMENTO REGIONALE TECNICO
UFFICIO DEL GENIO CIVILE**

LINEE GUIDA

PER LA REALIZZAZIONE DI LAGHETTI COLLINARI ED INVASI DI COMPETENZA DEGLI UFFICI DEL GENIO CIVILE

Lo scopo del Vademecum è quello di venire incontro a tutti quei professionisti che si occupano di tale problematica, in assenza di una normativa specifica sui piccoli invasi e laghetti collinari che per evidenti aspetti, molto spesso non sono trattabili come se fossero delle dighe di sbarramento *tout court* e che quindi necessitano di calcoli di verifica degli argini relativamente più semplici.

Le linee guida proposte sono valide sia nel caso che si debba realizzare un nuovo invaso e sia che bisogna adeguare e/o ampliarne uno esistente.

Si farà, quindi, riferimento a quelle opere di sbarramento per laghi artificiali con altezza di ritenuta, ossia altezza d'acqua al di sopra del piano di fondazione non superiore a 15 metri e in ogni caso a quei laghetti che seppur interrati presentano problematiche simili rispetto alla stabilità degli argini in rilevato.

SCHEDA INFORMATIVA PER L'UTENZA

Caratteristiche dell'invaso:

1. altezza inferiore a 10 metri;
2. volume invaso <1.000.000 di mc;
3. piccole derivazioni (portata necessaria per l'irrigazione inferiore a 1000l/sec, superficie da irrigare inferiore a 500 Ha).

Documentazione richiesta:

Istanza in bollo (in carta semplice per tutti gli Enti pubblici) ove si evidenzia:

1. l'oggetto dell'intervento che si prevede di realizzare completo di richiesta di parere ai sensi del D.P.R. 1/11/1959 n. 1363;
2. estremi della Ditta richiedente (data e luogo di nascita se persona fisica, ragione sociale se Società, codice fiscale e/o partita I.V.A., indirizzo, recapito telefonico);
3. estremi della Ditta esecutrice dei lavori (data e luogo di nascita se persona fisica, ragione sociale se Società, codice fiscale e/o partita I.V.A., indirizzo, recapito telefonico).

**DOCUMENTAZIONE TECNICA DA ALLEGARE, A FIRMA DELLA DITTA
COMMITTENTE, DEL PROGETTISTA, DEL DIRETTORE DEI LAVORI E PER LE
PROPRIE COMPETENZE, DAL GEOLOGO**

1. n. 2 copie catastali dell'estratto di mappa e del certificato relativo alle particelle interessate;
2. n. 2 copie della tavoletta I.G.M.I. al 25.000 (anche stralcio), con l'esatta ubicazione dell'invaso ed indicazione delle coordinate U.T.M. (designazione del punto);
3. n. 2 copie di relazione tecnica descrittiva dell'opera comprendente l'indicazione sulla fonte di approvvigionamento idrico, compresi portata e titolo giuridico, il calcolo per il dimensionamento delle opere di sfioro ed indicazione del relativo recapito finale, la descrizione dei materiali e metodologia di posa in opera, infine, la valutazione dei rischi diretti ed indiretti per la pubblica incolumità indotti dal manufatto;
4. n. 2 copie del progetto esecutivo in opportuna scala, contenente:
 1. planimetria a curve di livello (in opportuna scala) con ubicazione dell'opera, debitamente quotata e con l'indicazione della distanza da altri manufatti: costruzioni, nonché strade, corsi d'acqua, canali di scolo, etc.;
 2. pianta contenente la larghezza del piano di coronamento;
 3. dispositivo di tenuta ed eventuali filtri;
 4. ubicazione sfioratore e successivo scarico di superficie;
 5. eventuale scarico di fondo, al di fuori del corpo del rilevato;
 6. eventuali fossi di guardia, recinzioni, etc.;
 7. n. 2 sezioni principali sufficientemente estese oltre l'opera;
 8. particolari esecutivi.

(Nel caso di adeguamento e/o ampliamento, occorre presentare anche il rilievo relativo allo stato di fatto)
5. Documentazione fotografica del sito e delle opere;
6. n. 2 copie relazione geologica, firmata da un Geologo, contenente la descrizione delle caratteristiche geologiche del sito e di un sufficiente intorno, condizioni geomorfologiche con riferimento alle forme ed ai processi attivi (con riferimento anche alle prescrizioni del P.A.I. Sicilia), condizione geolitologica di dettaglio dell'area di interesse del manufatto, condizione litologica del manufatto; corredata di idonea cartografia, in opportuna scala con allegate sezioni significative; idonea caratterizzazione idrogeologica con redazione della carta generale del reticolo idrografico relativo al bacino interessato dall'invaso, utile ad eventuali calcoli idrologici.

7. n. 2 copie relazione di calcolo, a firma di un Tecnico abilitato, con verifiche di stabilità degli argini nella sezione maestra ed estese alle fondazioni, eventualmente al pendio e ai fronti di scavo, tenendo conto delle azioni sismiche e delle sottospinte idrauliche; nel caso di realizzazione dell'invaso in aree di pendio, dovranno essere verificate le condizioni di stabilità dell'intero versante ante e post operam in relazione alle caratteristiche litologiche e tecniche dei terreni interessati dallo scavo, accompagnate da calcolazioni di verifica a firma di Tecnico abilitato.
8. n. 4 copie di scheda tecnica come da fac-simile allegato a firma del progettista.
9. n. 2 copie dell'ubicazione su mappa catastale dell'intero fondo, dell'invaso, del canale fagatore e del punto di recapito finale;
10. n. 2 copie dell'ubicazione dell'invaso su cartografia del P.A.I.

La Ditta proprietaria è tenuta all'osservanza di tutte le disposizioni di Legge vigenti in materia ed in particolare:

- all'osservanza delle norme urbanistiche;
- al Decreto del Presidente della Repubblica 06.06.2001, n. 380 - Testo Unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia;
- all'osservanza del T.U. n. 1775 dell'11/12/1933 (Acque ed impianti elettrici);
- all'osservanza del R.D. n. 523 del 25/07/1904 (Testo unico delle disposizioni di Legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie);
- all'osservanza della L. n. 183 del 19/05/1989 art. 10 c.4 (Metodo per la determinazione del rischio potenziale dei piccoli invasi esistenti);
- all'osservanza del Regolamento di cui al D.P.R. n. 1363 del 1/11/1959 (Norme generali per la progettazione, costruzione ed esercizio);
- all'osservanza del D.L. 507/1994;
- all'osservanza del D.M. 24/03/1982;
- all'osservanza del D.M. LL.PP. 11/03/1988 (Norme tecniche per terreni opere di sostegno e fondazioni);
- circolare P.C.M. 13/12/1995, n. DSTN/2/22806, punto F;

- all'osservanza della L. 03/08/1998 Piano Stralcio di bacino per l'assetto idrogeologico (P.A.I.);
- al conseguimento del N.O. rilasciato dalla Soprintendenza ai BB.CC.AA. di Catania, qualora l'opera ricada in area soggetta a specifica tutela;
- Al conseguimento degli eventuali nulla osta rilasciati da Enti che hanno imposto vincoli (idrogeologico, forestale, Anas, Comune, Provincia regionale, etc.);
- delle Norme tecniche di cui al D.M. 14.01.2008 che definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni loro richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica e stabilità;
- della Circolare 02.02.2009, n. 617 relativa alle istruzioni per l'applicazione del D.M. 14.01.2008;
- delle Norme Tecniche per le costruzioni approvate con Decreto Ministeriale 17.01.2018;
- del Piano Straordinario per l'Assetto Idrogeologico approvato con Decreto del 04.07.2000.

Si fa presente che le istanze tendenti al rilascio del parere previsto ai sensi del D.P.R. 1363/59 per la realizzazione e la manutenzione di invasi irrigui in terra battuta, devono essere inoltrate in duplice copia cartacea come unica richiesta anche ai sensi dell'art.93 del D.P.R. 380/2001, in ossequio alle disposizioni di cui ai D.D.G. del Dipartimento Regionale Tecnico, n.8 del 13/01/2020, n.344 del 19/05/2020 e con nota prot. DRT n.20427 del 16/02/2024. I progetti, redatti nel rispetto delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17/01/2018, vanno trasmessi così come previsto dalle "Linee guida per la realizzazione e l'adeguamento di laghetti collinari ed invasi di competenza del Dipartimento Regionale Tecnico".

Per i progetti relativi alla regolarizzazione ed adeguamento di invasi irrigui fuori terra esistenti, essendo opere realizzate in violazione della normativa

sismica di cui alla L.02/02/1974 n.64 e ss.mm.ii., ma contemplate tra gli interventi edilizi sanabili ai sensi e per gli effetti dell'articolo 13 della legge 28 febbraio 1985, n. 47 e successive modifiche ed integrazioni, è necessario che contestualmente all'istanza ai sensi del D.P.R. 1363/59 , corredata dagli elaborati di rito, venga richiesto il parere per l'idoneità statica/sismica dell'opera previsto dall'art.110 della L.R. 4/2003.

SCHEDA RIEPILOGATIVA INVASI

1 LOCALIZZAZIONE									
REGIONE			Sicilia						
PROVINCIA REGIONALE									
COMUNE			Foglio di mappa			Particella			
TAVOLETTA I.G.M.I. (denominazione Foglio e quadrante)									
COORDINATE U.T.M. (designazione del punto)							Contrada		
2 GESTIONE INVASO									
PROPRIETARIO TERRENO									
GESTORE									
DESTINAZIONE D'USO									
3 ACCESSIBILITA' DELL'OPERA									
TRATTO DI ACCESSO PEDONALE									
TIPO DI STRADA DI AVVICINAMENTO									
4 RIFERIMENTI IDROGRAFICI									
DENOMINAZIONE CORSO D'ACQUA PIÙ VICINO									
Distanza dal corso d'acqua									
5 CATEGORIA SISMICA									
CATEGORIA									
6 TIPOLOGIA INVASO									
OPERA CON SBARRAMENTO IN MATERIALE SCIOLTO				SI			NO		
COMPLETAMENTE INTERRATO				SI			NO		
PARZIALMENTE INTERRATO				SI			NO		
IMPERMEABILIZZAZIONE				SI			NO		
7 ALIMENTAZIONE DELL'INVASO									
ALIMENTAZIONE									
8 ORGANI DI SCARICO									
SCARICO DI SUPERFICIE				SI			NO		
SCARICO DI FONDO				SI			NO		
9 VALUTAZIONE DELL'INVASO									
INCLINAZIONE VERSANTI (°)				° paramento di monte; ° paramento di valle					
FORMA GEOMETRICA DELL'INVASO									
SUPERFICIE SOMMITALE (mq)									
QUOTA DI CORONAMENTO (mslm)									
SVILUPPO CORONAMENTO (m)									
LARGHEZZA MEDIA DI CORONAMENTO (m)									
ALTEZZA MASSIMA (m)				(fuori terra); (dal fondo invaso)					
VOLUME (mc)				Totale = - Volume invasabile =					
RECINZIONE (TIPO)				SI			NO		
10 INSEDIAMENTI ED INFRASTRUTTURE TURISTICHE E SPORTIVE									
UNITÀ ABITATIVE									
Distanza dall'invaso e azimut				Km			(°)		
ALBERGHI									
Distanza dall'invaso e azimut				Km			(°)		
CAMPEGGI E VILLAGGI TURISTICI									
Distanza dall'invaso e azimut				Km			(°)		
CENTRI SPORTIVI									
Distanza dall'invaso e azimut				Km			(°)		

	DISTANZA DALLA STRADA E TIPO DI STRADA	Km		Tipo	
11	INFRASTRUTTURE INDUSTRIALI, DI TRASPORTO E CONDUTTURE				

PARAMETRI GEOTECNICI

Ai fini del calcolo di verifica sulla stabilità degli argini di un invaso, occorrerà tenere conto di alcuni parametri fondamentali.

Dal momento che una struttura in terra per ritenuta d'acqua è costituita fondamentalmente da materiale discontinuo, composto da particelle di materia solida intercalate da spazio vuoto, il quale potrà essere occupato da aria o da acqua, presenta: sotto l'aspetto idraulico, una certa permeabilità ed è quindi sede di deflusso filtrante; dal punto di vista meccanico - siamo invece in presenza di un corpo che sarà capace di sopportare le azioni esterne in virtù di caratteristiche specifiche che sono la coesione e l'attrito interno.

E' evidente, quindi, che il calcolo della struttura in terra si divide in due ordini di problemi diversi.

Vi è un problema idraulico relativo al moto filtrante dell'acqua entro ammassi porosi e vi è il problema meccanico della stabilità.

In sede di progetto occorrerà, quindi, individuare i dettagli litostratigrafici e strutturali dei litotipi presenti nel corpo di fondazione degli argini.

Saranno determinate le proprietà meccaniche, con particolare riguardo alla resistenza e deformabilità, e la permeabilità del terreno, sia esso sciolto o lapideo, almeno fino alla profondità a cui potrà risultare apprezzabile l'influenza dei carichi esercitati dallo sbarramento e delle azioni esercitate dall'acqua nell'invaso.

Inoltre dovranno essere determinate le caratteristiche di circolazione idrica sotterranea.

Ai fini della verifica di stabilità degli argini di un invaso, sarà necessario conoscere alcuni parametri fondamentali del terreno; essi sono:

- γ_t : peso di volume delle particelle solide costituenti il terreno;
- γ_a : peso di volume del terreno allo stato asciutto, cioè comprensivo del vuoto e del pieno (considerando il vuoto come riempito esclusivamente da aria);
- γ_s : peso di volume del terreno saturo (ossia con i vuoti riempiti di acqua);
- γ_u : peso di volume del terreno umido (ossia i vuoti parzialmente riempiti di acqua), esso può assumere un qualunque valore compreso tra gli estremi γ_a e γ_s ;
- γ_w : peso di volume dell'acqua;
- γ_g : peso specifico di galleggiamento o del terreno sommerso in acqua, esso sarà dato da $\gamma_g = \gamma_s - \gamma_w$;
- γ_m : peso di volume medio; la linea di saturazione taglia quasi sempre la verticale di separazione MN (vedi fig. 1) così che la parte a valle sotto esame comprende un prisma di terreno saturo di acqua. Occorre calcolare, per prima cosa, il peso di volume efficace del complesso, e ciò si otterrà a mezzo di una media pesata: al materiale sotto

$$\gamma_m = \sqrt{\gamma_g * \gamma_a}$$

- ## SCHEMA DI VERIFICA DEI PICCOLI INVASI

Fig. 1

The diagram illustrates a trapezoidal cross-section of a dam or embankment. The top surface is horizontal, with points M and N marked. The bottom surface is horizontal, with points R and S marked. A vertical dashed line passes through M and N. The left slope is labeled F, and the right slope is labeled H. The horizontal distance from R to N is labeled B_m , and the horizontal distance from N to S is labeled B_v . The vertical distance from the bottom surface to the top surface is labeled H_1 . The diagram is labeled Fig. 1.

La parte anteriore RMN è divisa dalla
le avente per traccia la retta MN.

Normalmente la sezione più sollecitata è quella di fondazione e la situazione più pericolosa corrisponde al "serbatoio" pieno (fig. 2).

[illegible]

so pieno e ad invaso rapidamente svuotato. Nel caso, invece, di invaso totalmente incassato si effettuerà solo la verifica ad invaso vuoto.



Con l'entrata in vigore del D.M. 14 Gennaio 2008 e oggi col D.M. 17.01.2018 la stima della pericolosità sismica, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido ($V_{s30} > 800 \text{ m/sec}$), viene definita mediante un approccio dipendente dal sito e non più tramite un criterio "zona dipendente"; ossia la classificazione sismica del territorio, secondo la nuova normativa, non individua l'azione sismica di progetto in funzione delle zone.

Nell'allegato A del decreto 14/01/2008 viene descritta la procedura per il calcolo delle strutture e la determinazione di tre parametri fondamentali, calcolati in funzione del reticolo di riferimento (allegato B delle NTC 2008).

Sul territorio italiano è stata individuata una maglia di circa 5.5 chilometri di lato, associando a ciascun nodo la definizione dei parametri.

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi (dirette o indirette), come indicato nel § 7.11.5 delle NTC-08. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento ad un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento (vedi tabella sotto).

– Categorie di sottosuolo

Categoria	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250 \text{ kPa}$ nei terreni a grana fina).
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250 \text{ kPa}$ nei terreni a grana fina).
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70 \text{ kPa}$ nei terreni a grana fina).
E	Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800 \text{ m/s}$).

Occorrerà, quindi, procedere all'acquisizione della categoria topografica "T" che darà il valore massimo del coefficiente di amplificazione " S_T "

Relativamente ai calcoli di verifica si dovrà considerare per il calcolo dell'azione sismica orizzontale della massa strutturale il seguente algoritmo:

$K_h = \beta s \cdot a_{\max} / g \quad (\text{cap. 7.11.3.5.2 del D.M. 14/01/2008})$

nel caso che il valore di K_h fosse minore di 0.07 si userà comunque 0.07, invece nel caso che fosse maggiore si adotterà il valore calcolato.

sforzo totale di taglio T_v agente sulla base $NS = bv$ è dato dalla somma di tali forze:

Y = differenza fra la quota di massimo invaso e la quota del punto generico del paramento a cui è associata la pressione **F_s**

$$c = cm/2 [Y/Y_0 (2 - Y/Y_0) + \sqrt{Y/Y_0 * (2 - Y/Y_0)}]$$

[*cm* varia al variare dell'inclinazione del paramento rispetto alla verticale (vedi D.M. 24/03/82)]

α	0°	5°	10°	20°	40°	$\geq 60^\circ$
<i>cm</i>	0.74	0.70	0.6 7	0.60	0.45	0.30

5) Spinta del terrapieno a monte della sezione MN: $F_T = [\gamma_m H_1^2 \tan^2 (45 - \phi/2)] / 2$

dalla somma delle forze ricavate si ottiene lo sforzo totale **T_v**

$$T_v = S + F_o + F_v + F_s + F_T \quad (1)$$

Di fronte allo sforzo **T_v** sta la resistenza **R_v** allo scorrimento che il materiale è capace di sviluppare. Essa si compone di due parti: la parte dovuta all'attrito (uguale al peso **P_v** del materiale che grava sopra la sezione in esame moltiplicato per la tangente dell'angolo di attrito, e la parte dovuta alla coesione **P_v = A_(SMNS) * γ_s (3)** .

La resistenza **R_v** offerta dall'ammasso MNS vale:

$$R_v = P_v * \tan \phi = A_{SMNS} * \gamma_s * \tan \phi \quad (2)$$

e nel caso si sia in condizioni drenate si tenga conto della coesione, quindi si ha:

$$R_v = P_v * \tan \phi + c_u * b_v \quad (3) \quad (\text{in termini di coesione totale})$$

$$R_v = P_v * \tan \phi + c' * b_v \quad (3) \quad (\text{in termini di coesione efficace})$$

Il rapporto η fra la capacità di resistenza e il carico da sopportare dovrà essere maggiore o uguale a 1.4 (4)

$$\eta = R_v / T_v \geq 1.4 \quad (4)$$

esso rappresenta il margine medio di resistenza offerto dalla struttura e rappresenta il coefficiente di sicurezza medio della parte a valle della "diga".

VERIFICA A SERBATOIO VUOTO O A FINE COSTRUZIONE (verifica a monte approssimata)

1) Spinta del terrapieno a monte della sezione MN: $F_T = [\gamma_u H_1^2 \operatorname{tg}^2 (45 - \varphi/2)] / 2$

2) Somma delle Forze agenti: $T_m = F_o + F_v + F_T$

3) Resistenza a monte: $R_m = A_{(RTMNR)} * \gamma_u * \operatorname{tg} \varphi + c' * b_m$

Il rapporto η fra la capacità di resistenza e il carico da sopportare dovrà essere maggiore o uguale a 1.3 (5)

$$\eta = R_m / T_m \geq 1.3 \quad (5)$$

VERIFICA A SERBATOIO RAPIDAMENTE SVUOTATO DAL LIV. MAX AL LIV. MIN (verifica a monte approssimata)

La situazione più pericolosa si presenta quando l'invaso resta per lungo tempo pieno, e quindi viene rapidamente svuotato (situazione molto realistica nel caso di invasi per uso agricolo) in tal modo viene a mancare l'azione di sostegno esercitata dalla spinta idrostatica contro il paramento a monte, mentre il corpo arginale, che non ha avuto tempo di svuotarsi per filtrazione, resta imbevuto d'acqua.

VERIFICA PER STRISCIA UNITARIA

Si considera a vantaggio della sicurezza la porzione di ammasso RTMNR.

Lo sforzo totale di taglio T_m agente sulla base RN approssimativamente, assume il valore:

$$T_m = [\gamma_s * H_1^2 * \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)] / 2 + \gamma_w (2/3 H)^2 / 2 + K_h * A_{RTMNR} * \gamma_g$$

La resistenza R_m offerta dall'ammasso RTMNR vale:

$$R_m = P_m * \operatorname{tg} \varphi = A_{RTMNR} * \gamma_g * \operatorname{tg} \varphi$$

$$\eta = R_m / T_m \geq 1.3$$

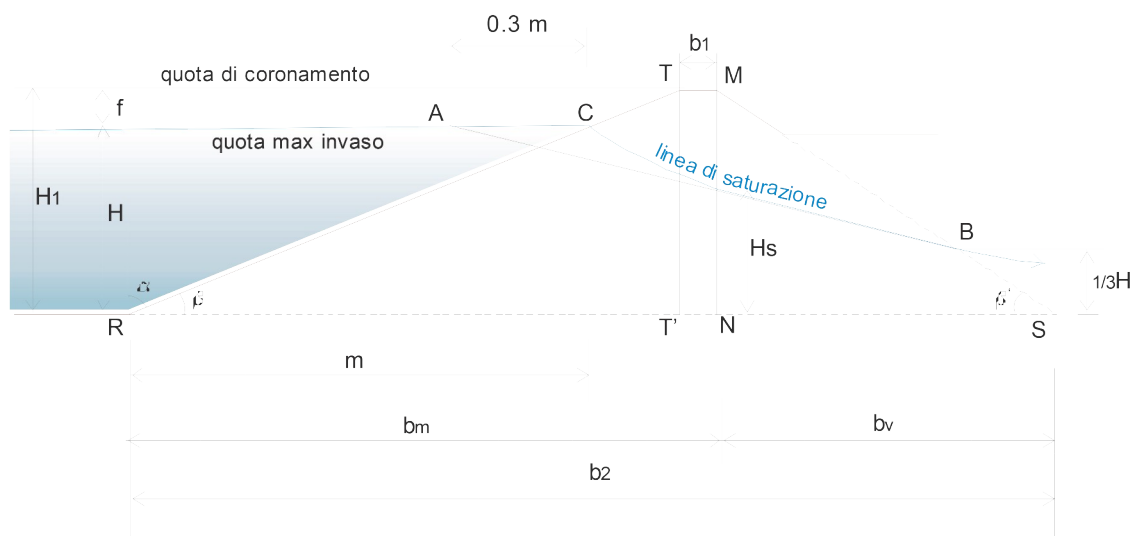
Gli schemi di calcolo esposti sopra valgono, oltre che per la base della "diga", anche per ogni sezione orizzontale più alta, e possono quindi utilizzarsi, all'occorrenza, per indagare l'intera struttura.

CALCOLI IDRAULICI

I problemi da risolvere nella progettazione o nell'adeguamento di un vaso sono fondamentalmente di tre tipi e riguardano gli argini:

1. andamento della linea di saturazione;
2. valore della portata di filtrazione attraverso l'opera;
3. sicurezza contro il pericolo di sifonamenti.

Se osserviamo la sezione trasversale dell'argine (considerato in terra) (fig. 4), la linea di saturazione è la più alta linea di flusso del moto filtrante.



In tutti i punti al di sotto di tale linea il materiale è saturo d'acqua e quindi soggetto alla pressione idrostatica, mentre al di sopra della linea, la pressione manca.

ANDAMENTO DELLA LINEA DI SATURAZIONE

È possibile, tracciare qualsiasi reticolo idrodinamico partendo dalla valutazione delle condizioni al contorno e procedendo per tentativi ricordando che le linee di corrente equipotenziali sono tra loro ortogonali e che le maglie devono avere le diagonali congiungenti i vertici opposti perpendicolari tra loro.

La costruzione del reticolo idrodinamico permette, inoltre, il calcolo della spinta dell'acqua sulla superficie di fondazione dell'opera, denominata sottospinta ed il calcolo per la verifica al sollevamento del terreno al piede dell'opera (sifonamento). Tracciare il reticolo idrodinamico significa quindi delineare l'andamento del potenziale ϕ nel terreno: noto il valore del potenziale ϕ è possibile determinare il valore del carico idraulico nel terreno $h = \phi/k$ e della pressione $p = \gamma h$.

Il reticolo idrodinamico permette il calcolo delle pressioni, mentre per conoscere il valore della portata filtrante attraverso le singole maglie si può usare la formula

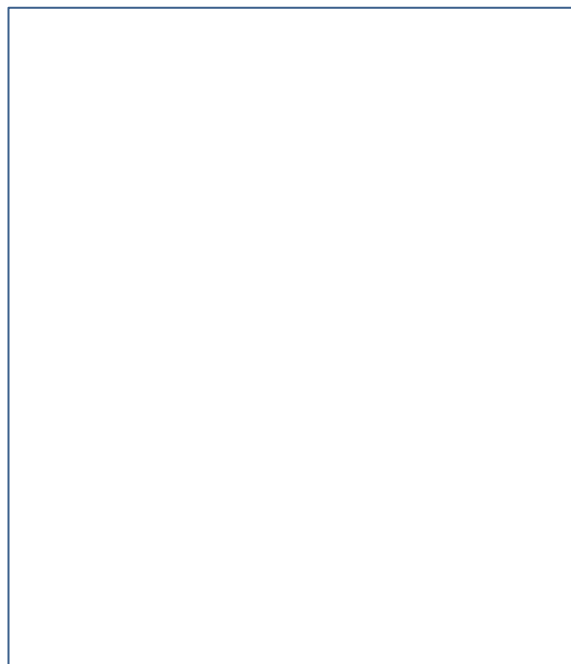
$$Q = nk (\partial h/N)$$

con un coefficiente di permeabilità medio pari a:

$$k = \sqrt{k_o \cdot k_v}$$

Infine, in considerazione degli obiettivi che si intendono conseguire e della permanenza per lunghi periodi di tempo di elevati livelli idrici, il tracciamento della linea di superficie libera (phreatic surface) all'interno di un argine può essere fatto riferendosi al metodo grafico suggerito dall'Evangelisti nel suo libro "Impianti Idroelettrici" (vol. I, par. 74, pp. 159-160), e, più in particolare, alla figura seguente tratta dal testo:

Fig. 5



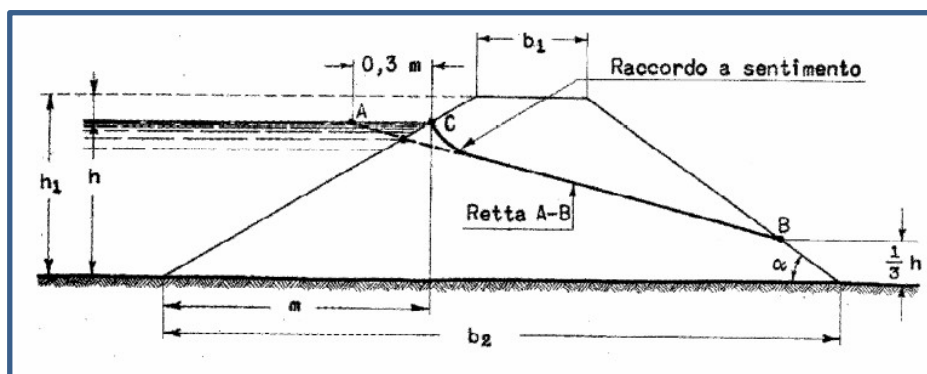
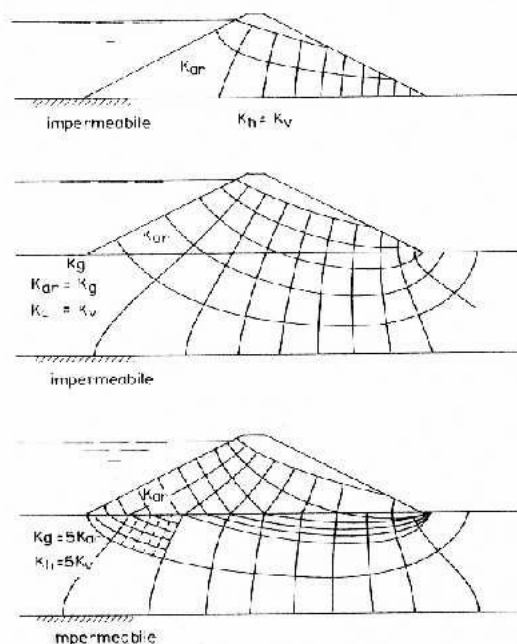


Fig. 6 – Schema di riferimento per il tracciamento della linea di saturazione in un rilevato permeabile su terreno impermeabile

La linea di permeazione nell'interno dell'argine è una curva convessa verso l'alto, che senza incorrere in grave errore, può considerarsi rettilinea con costruzione relativamente semplice.

Si consideri omogeneo il materiale che costituisce la "diga", e considerati:

- H : altezza dell'acqua nell'invaso al di sopra del piano di fondazione;
- m : lunghezza della proiezione del paramento bagnato sopra il piano di fondazione, supposto orizzontale;
- f : distanza verticale fra il pelo d'acqua e la sommità dell'argine (franco);
- b_1 : larghezza del piano di coronamento;
- b_2 : larghezza dell'argine alla base;
- β' : angolo fra il paramento a valle e il piano di fondazione;
- L : lunghezza media del percorso di filtrazione.

Si segnino i due punti A e B: il primo è situato sul pelo d'acqua nell'invaso, alla distanza orizzontale dal paramento a monte dell'argine uguale a 0.3m; il secondo si trova sul pa-

ramento a valle alla quota di $1/3H$ sopra il piano di fondazione. Si tracci la retta AB e si congiunga, con un breve raccordo a sentimento, questa retta col punto C, intersezione del pelo d'acqua nell'invaso col paramento a monte: La linea BC può essere assunta come linea di permeazione.

La lunghezza media di filtrazione " L_f " si potrà calcolare con la seguente formula

$$L_f = (1.13 H + 2f) \operatorname{ctg} \beta + b_1$$

Determinata L_f , la portata di filtrazione Q per unità di spessore d'argine ha il seguente valore:

$$Q = 4/9K * (H^2/L)$$

La fig. 4 dimostra che nelle dighe di materiale in terra omogeneo il paramento a valle è intersecato dalla linea di permeazione ed è quindi portato a trapeolare acqua nella sua porzione inferiore; inutile dire che questa è una situazione pericolosa che si dovrà cercare di evitare. In questi casi è raccomandabile inserire alla base della parte a valle del corpo arginale uno strato di materiale più permeabile, con funzione di drenaggio atto ad abbattere la linea di saturazione (fig. 2). Nella pratica comune il corpo arginale è costituito da materiale disomogeneo, anche per effetto delle costipazioni di posa in opera per cui la permeabilità verticale è inferiore a quella orizzontale. Si potrà allora considerare un valore di permeabilità ideale dato dalla media geometrica dei due valori:

$$k = \sqrt{k_v * k_o}$$

SICUREZZA CONTRO IL PERICOLO DI SIFONAMENTI

È un problema idraulico che interessa principalmente il terreno di fondazione degli argini in genere; se esso è caratterizzato da valori di permeabilità relativamente non trascurabile, occorre che sia verificata la condizione che il deflusso filtrante attraverso la fondazione sia sufficientemente lento da evitare quei pericolosi fenomeni denominati sifonamento che causano l'asportazione di materiale da parte del flusso d'acqua.

Un moto di filtrazione che si instaura attraverso un corpo arginale conseguente al perdurante mantenimento del livello idrico all'interno di un vaso, per prolungate e intense piogge, parallelamente a scarse caratteristiche di permeabilità dei materiali costituenti i rilevati arginali, alle ridotte sezioni trasversali degli stessi e all'eventuale presenza di tane o ceppaie e, più in generale, di vie preferenziali di deflusso può dare origine a fenomeni di instabilità. Dapprima, si possono formare dei fontanazzi localizzati al piede dei rilevati arginali sul lato campagna e poi, in seguito all'instaurarsi di fenomeni di erosione interna (piping), le aperture si possono allargare fino a provocare il cedimento per fenomeni di scivolamento dei paramenti lato campagna (landside) oppure l'eventuale sprofondamento della parte sommitale dell'argine all'interno della cavità precedentemente formatasi nel corpo arginale.

Nella letteratura tecnica italiana i fenomeni di collasso strutturale di un argine, connessi con i fenomeni di filtrazione, vengono indicati genericamente col nome di 'sifona-

mento'. Di contro, nella letteratura tecnica anglosassone, con maggiore rigore, tali fenomeni vengono più specificatamente indicati col nome di 'piping', 'heaving' e 'roofing'.

La caratteristica che accomuna questi fenomeni è l'erosione ed il trasporto di materiale che avviene in taluni punti interni all'argine o al terreno di fondazione dove il gradiente idraulico e la velocità di filtrazione assumono valori critici causando spostamenti di intere porzioni di terreno che si possono tradurre in inclinazioni, cedimenti differenziali od anche lesioni delle strutture idrauliche con perdita della loro funzionalità.

La stabilità di un rilevato arginale, in fase di esercizio, è legata alla variazione dei livelli di invaso ed ai moti di filtrazione (seepage). In particolare, per quanto riguarda la sponda dell'argine lato monte, si possono avere fenomeni di instabilità a causa degli svasi più o meno rapidi ed ai moti di filtrazione alimentati dalle falde a campagna; mentre per quanto riguarda la sponda lato valle (campagna) la stabilità è legata essenzialmente ai moti di filtrazione che si possono creare nel rilevato o nel terreno.

Si possono avere problemi di stabilità e di cedimenti di carattere puramente geotecnico quando sono direttamente interessati strati di terreno argilloso o argilloso-limoso normalmente consolidato, strati di argilla e limo con terreno organico, strati di terreno organico di vario tipo. Mentre con argille sovraconsolidate e più in particolare con sabbie e ghiaie o con rocce vi possono essere problemi di stabilità strettamente legati alle infiltrazioni di acqua ovvero problemi di sifonamento in quanto è più facile che un regime di moti di filtrazione (seepage) possa dar luogo a fenomeni erosivi tipo piping.

Il piping è un fenomeno dinamico, generalmente si sviluppa a partire dall'unghia di valle dell'opera regredendo verso monte attraverso vie preferenziali all'interno del terreno di fondazione o del rilevato o tra rilevato e fondazione (Sellmeijer, 1988). La rimozione delle particelle (in genere della frazione più fina o di quella con minore peso specifico) ha, pertanto, inizio sul lato campagna manifestandosi, talvolta, con la presenza di piccole sorgenti localizzate (sand boil).

Successivamente, il fenomeno di erosione tende ad estendersi verso monte, con un meccanismo di tipo regressivo, per effetto dell'incremento di velocità dovuto alla riduzione delle resistenze idrauliche, fino al conseguente collasso dell'opera.

Sherard nel 1963 ha condotto degli studi sul meccanismo del piping rispetto alle dighe in terra e a quelle miste formate da terra e rocce. Egli ha osservato che quando si instaura un moto di filtrazione la pressione viene dissipata dall'attrito dovuto alle forze di trascinamento che si oppongono al moto dell'acqua attraverso i pori presenti nel terreno. L'acqua, filtrando, genera erosione e tende a trascinare via con sé le particelle di terreno. Se l'erosione dovuta alla filtrazione dell'acqua assume valori significativi, le particelle di terreno vengono trasportate via ed ha inizio il piping. Se il terreno è coesivo, si possono formare dei piccoli conali al di sotto del percorso seguito dalla filtrazione. Una volta che si è innescato il piping, il flusso all'interno del tubicino tende ad aumentare in quanto diminuiscono le forze di attrito, ed il fenomeno accelera trasformando i piccoli tunnel in veri e propri tubi d'acqua sotterranei. Secondo Van Zyl e Harr l'analisi degli effetti erosivi dovuti al piping non è di facile interpretazione a causa delle numerose discontinuità. Nonostante ciò, gli approcci sviluppati da Bligh (1927) e Lane (1935) sono ancora oggi largamente usati per la progettazione di dighe ed argini.

Nei terreni argillosi o limosi ovvero con una grande percentuale di particelle fini e quindi coefficiente di permeabilità molto basso si può avere molto più facilmente 'heaving' ovvero sollevamento globale della massa di terreno, specialmente quando in corrispondenza del piede dell'opera la permeabilità degli strati superficiali è molto più bassa di quelli sottostanti.

In questi terreni un rapido incremento del carico idraulico può comportare il sollevamento del terreno superficiale, comportando la rottura del paramento lato campagna (landside). Di contro, anche un incremento molto lento del carico idraulico può comportare sifonamento per heaving.

Si parla di 'roofing' per indicare quel fenomeno, ancora connesso col piping, che si basa sul trasferimento di materiale dallo strato di fondazione dell'argine verso le sezioni di valle della struttura.

L'innescio di tale fenomeno avviene nel momento in cui viene raggiunto il valore critico della velocità di filtrazione che è a sua volta funzione della granulometria del terreno.

Per cui, evidentemente, per prevenire questo tipo di instabilità, connessa con i moti di filtrazione, bisogna rendere basse, appunto, le velocità di filtrazione in special modo dove minori sono le resistenze della struttura. Uno dei punti più vulnerabili della struttura all'infiltrazione dell'acqua, è sicuramente la base della struttura arginale per la difficoltà di creare un contatto solidale fra il materiale costituente l'intradosso della struttura ed il terreno di fondazione.

I primi a teorizzare questo fenomeno sono stati Bligh (1910) e Lane (1935) che hanno elaborato dei coefficienti di sicurezza dipendenti dal particolare tipo di terreno. Il suddetto coefficiente di sicurezza può essere determinato con metodi che fanno riferimento al gradiente idraulico medio i_m , definito come rapporto tra il carico idraulico ed il percorso della linea di flusso più corta.

Secondo Bligh (1910) il rapporto $C=(L/h)$ tra il percorso più breve L che l'acqua compie per portarsi da monte a valle ed il carico idraulico h , detto rapporto di scorrimento, deve assumere valori compresi tra 3 e 20 a seconda del tipo di terreno affinché siano garantite condizioni di sicurezza; si hanno i seguenti valori di C :

Fango o limo	20
Sabbia fine	15
Sabbia medio-grossa	10
Ghiaia	5
Argilla media	6
Argilla compatta	3

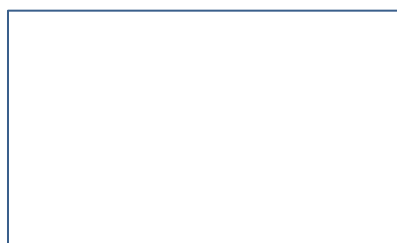
In particolare, se si vuole portare in conto l'anisotropia del terreno ovvero la maggiore permeabilità del terreno in una direzione (quella orizzontale) rispetto all'altra (quella verticale), il coefficiente di sicurezza viene calcolato con l'espressione:

$$C = \frac{1/3 L_o + L_v}{h} \quad (\text{regola di Lane, 1935})$$

Sabbia molto fine o limo	8,5
Sabbia fine	7,0
Sabbia media	6,0
Sabbia grossa	5,0
Ghiaia fine	4,0
Ghiaia media	3,5
Ghiaia grossa con ciottoli	3,0
Massi con ciottoli e ghiaia	2,5
Argilla molle	3,0
Argilla media	2,0
Argilla compatta	1,8
Argilla molto compatta	1,6

in cui L_o e L_v sono le lunghezze dei percorsi, rispettivamente, orizzontale e verticale.

C assume valori tabellati:



I valori più elevati di C si riferiscono a terreni con granulometria più fina (sabbie fini e limose), quelli più bassi a materiali di granulometria più grossolana.

Di norma negli argini formati con terreni limosi ed argillosi bastano piccoli valori della coesione per impedire l'asportazione delle particelle di terreno anche in condizioni di gradiente idraulico prossimo al valore critico.

Per Opere modeste si potrà studiare il fenomeno con una regola empirica: la regola di Bligh; ossia il complessivo sviluppo perimetrale $L_a = b_2$ del profilo di fondazione deve soddisfare alla disuguaglianza

$$L_a = b_2 > C * H$$

Dove C è un coefficiente che dipende dalla natura del terreno, che può assumere valori compresi fra un massimo di 20 per materiale incoerente finissimo (fango e limo) e un minimo di 3 per le argille molto dure e compatte ed H è l'altezza di massimo invaso.

VERIFICHE DELLE PORTATE DI DEFLUSSO DELLE OPERE SFIORANTI

Ai fini del progetto dell'invaso occorrerà dimensionare le opere di sfioro (sfioratore s.l.; canale fugatore, etc.).

Allo scopo si dovrà tenere conto della piovosità media dell'area su cui insiste l'opera e determinare la portata di deflusso dall'invaso tenendo conto anche dell'acqua che vi viene inserita artificialmente.

Fatto ciò sarà importate effettuare le verifiche idrauliche delle sezioni dei canali fuggatori utilizzati e del punto di recapito finale.

ULTIMAZIONE DEI LAVORI

All'ottenimento di tutti i Nulla Osta necessari e al completamento delle opere autorizzate, l'istante dovrà depositare all'Ufficio del Genio civile, con lettera di accompagnamento, una **RELAZIONE DI REGOLARE ESECUZIONE**, in doppia copia, firmata dal Direttore dei Lavori.

In essa dovranno essere descritte le opere realizzate e la conformità al progetto approvato e si dovrà allegare, inoltre:

- Copia dei N.O. militari ottenuti;
- Eventuale bonifica da ordigni bellici effettuata, quando ordinata dalle Autorità militari competenti;
- Documentazione fotografica delle opere d'arte realizzate;
- Piano di manutenzione dell'opera.

NOTE

- **altezza:** Con il termine di altezza si intende la differenza tra la quota del piano di coronamento, e quelle del punto più depresso dei paramenti da individuare su una delle due linee di intersezione tra paramenti e piano di campagna;
- **volume di invaso:** si considera la cubatura invasabile compresa tra la quota più elevata della soglia di scarico dallo sfioratore, e la quota del punto più depresso del paramento di monte da individuare sulla linea di intersezione tra detto paramento e il piano di campagna;
- il **Franco netto** (differenza tra la quota di coronamento ed il massimo livello di acqua invasabile) deve essere maggiore o uguale a m. 1.00 ad esclusione delle opere assimilabili a dighe o traverse, per le quali il franco netto deve essere non inferiore a m. 1.50;
- lo **sfioratore** deve essere previsto a cielo aperto e rivestito di calcestruzzo. Le sue dimensioni dovranno essere desunte da calcoli idraulici determinando la portata di massimo deflusso e verificando il libero deflusso dallo sfioratore, calcolato come luce a stramazzo a larga soglia, fermo restando che nel caso in cui l'alimentazione avvenga esclusivamente a gravità, lo sfioratore dovrà essere dimensionato per smaltire una portata doppia di quella massima convogliabile dal canale di adduzione; nel caso che l'immissione di acqua nell'invaso avvenga esclusivamente tramite pompa, lo sfioratore potrà essere costituito da un tubo, opportunamente dimensionato, avente diametro, comunque, non inferiore a mm 300;
- il **canale fугatore** (di collegamento tra lo sfioro ed il recapito finale delle acque di esubero) dovrà essere dimensionato opportunamente per essere in grado di fare defluire la portata massima di sfioro e dovrà scaricare le acque di esubero nell'incisione o fosso più vicino ed in ogni caso distante dal piede dei rilevati dell'invaso;
- l'invaso dovrà essere provvisto di **recinzione** con altezza non minore di m 1.50, posta a non meno di cm 30 dal ciglio interno del piano di coronamento;

Riferimenti bibliografici:

D.M. 24/03/1982;
D.M. 14/01/2008;
D.M. 17/01/2018;
IL CALCOLO DELLE PICCOLE DIGHE IN TERRA – G. Evangelisti.