

APPUNTI DI GEOLOGIA APPLICATA

Capitolo 7

GEOLOGIA DEI SERBATOI ARTIFICIALI

A Cura di V. Francani e C. Rampolla

Gli sbarramenti che vengono costruiti allo scopo di immagazzinare acqua da destinare alla produzione di energia elettrica o gli usi agricoli e potabili assumono varie denominazioni a seconda delle dimensioni e della struttura, nonché della funzione svolta; ci occupiamo qui solamente delle dighe.

La DIGA è un'opera di sbarramento a una valle o a un corso d'acqua ed è costruita per:

- Creare una riserva d'acqua da poter utilizzare per molteplici fini (produzione di energia, irrigazione, uso potabile o industriale) a seconda delle necessità e senza essere soggetti alle precipitazioni meteoriche o al regime del corso d'acqua;
- Regolare le portate fluviali (moderare le piene e integrare le portate naturali nei periodi di magra);
- Intercettare il corso di un fiume e facilitare la captazione dell'acqua fino alla portata che si intende derivare;
- Trattenere i materiali solidi trasportati dal corso d'acqua

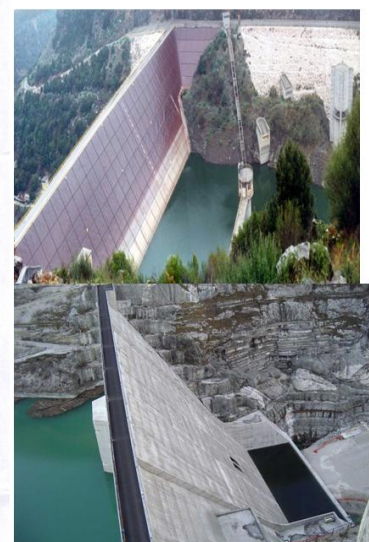
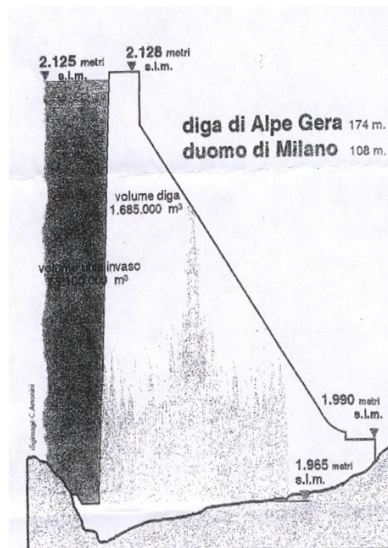
DEFINIZIONE di "DIGA":

opera di sbarramento che determina la formazione di un invaso o lago artificiale. La costruzione di una diga, e la conseguente creazione di un lago artificiale a monte, comporta la risoluzione di problemi geologici molto complessi, che comprendono quasi tutti gli aspetti della geologia applicata quali: le indagini geofisiche, le perforazioni, l'idrogeologia, i movimenti franosi, la geologia delle strade e delle gallerie, ecc.

La tipologia delle dighe è alquanto differenziata, si possono riconoscere diversi tipi fondamentali:

1. DIGHE IN MURATURA:

1.1. Le dighe a gravità svolgono la loro funzione di sbarramento opponendosi alla spinta esercitata dall'acqua contenuta nel bacino con una struttura massiccia alla base e sempre più sottile man mano che ci si avvicina alla sommità (coronamento). I carichi esercitati dalla diga sui terreni di fondazione sono piuttosto elevati.



1.2. Le **dighe ad arco** (dette talora a cupola) sono invece più sottili, pur rastremandosi verso l'alto, e scaricano sulle fondazioni una pressione ancora maggiore, tale da superare spesso i 10 Kg/cm². Queste strutture scaricano anche la pressione sulle spalle della diga e quindi sulla roccia posta ai lati. La pressione idrostatica, per l'effetto arco, viene scaricata sulle spalle della stretta da sbarrare. Possono essere:

- ad arco semplice
- ad arco-gravità
- a doppia curvatura



Diga ad arco



Diga ad arco-gravità



Diga a doppia curvatura

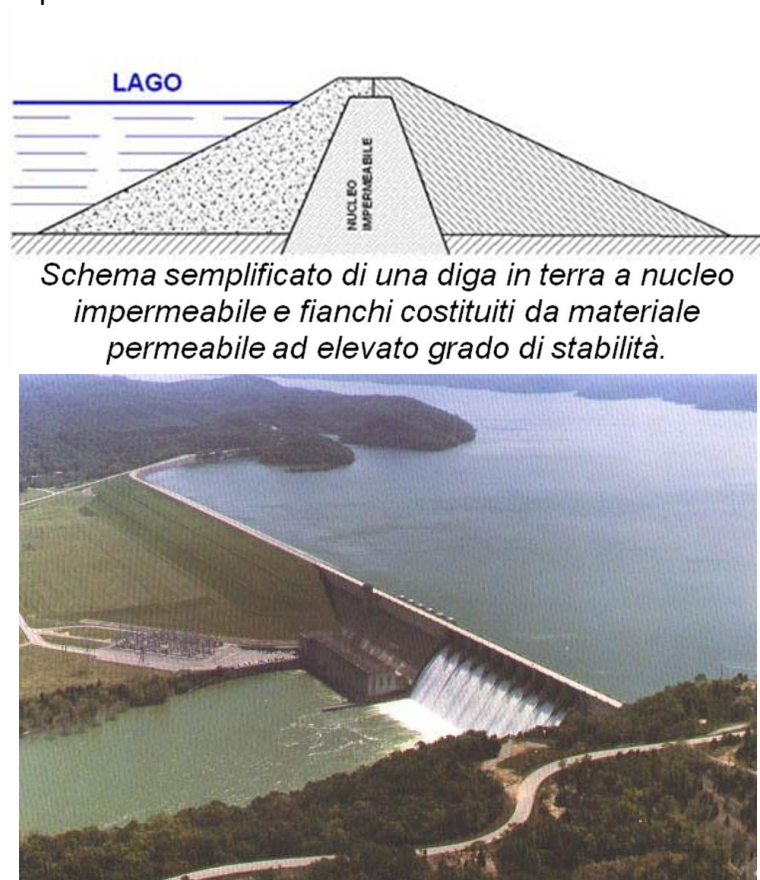
1.3. Le **dighe a speroni**: è una diga a gravità in cui sono presenti dei vani di alleggerimento.



2. **DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI**

2.1. Le **dighe in terra** sono costituite da materiali sciolti disposti in modo da gravare su una larga base d'appoggio, con pendenze sufficientemente ridotte da garantire il mantenimento

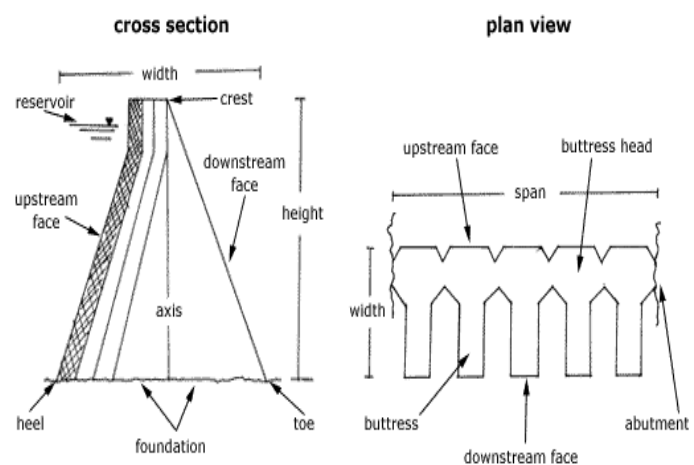
dell'equilibrio dei fianchi. Setti impermeabili, posti al nucleo dello sbarramento, impediscono la filtrazione delle acque all'interno e al disotto della costruzione.



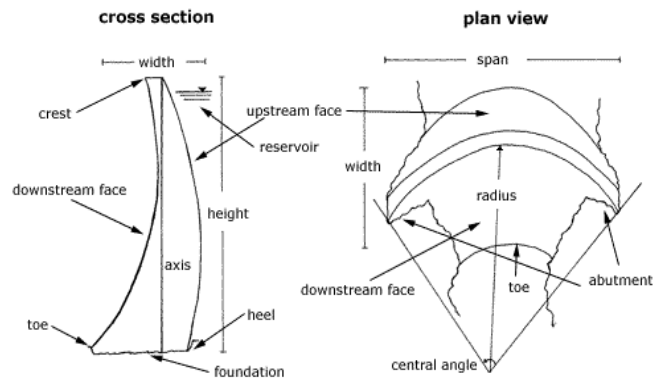
SCHEMA DI UNA DIGA

Nella figure seguenti sono rappresentati delle sezioni trasversali e le immagini in pianta delle diverse tipologie di diga.

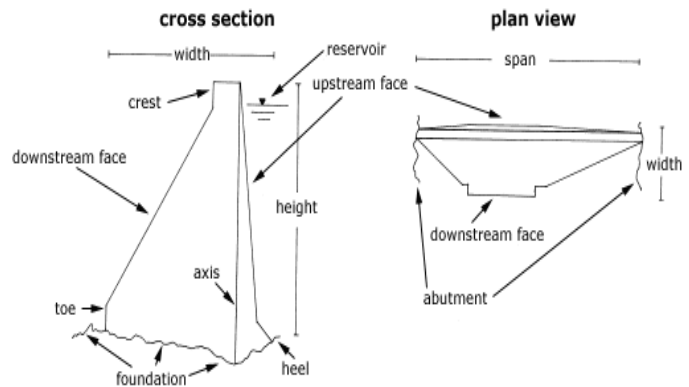
- diga a speroni



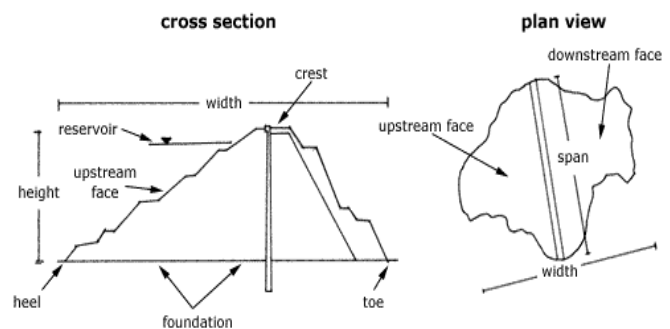
- diga ad arco



- diga a gravità



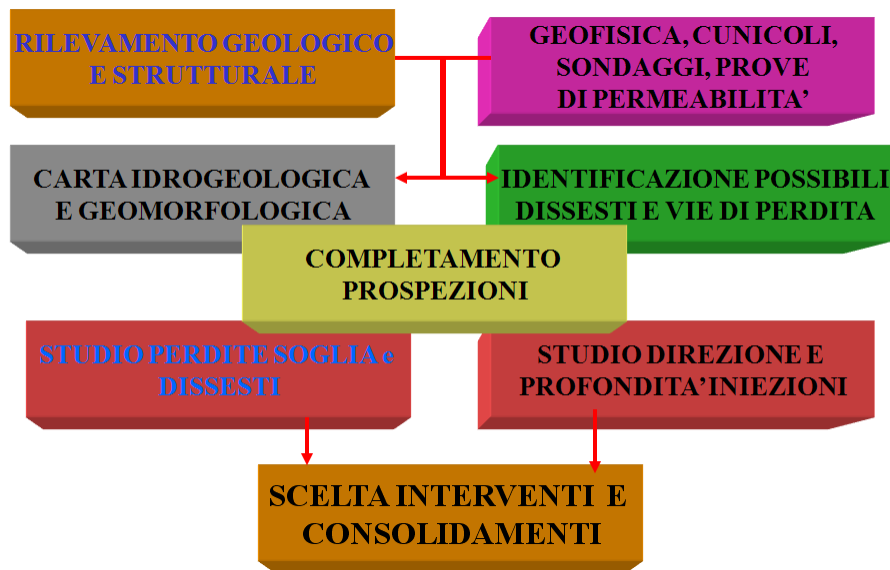
- diga in terra



PROGETTI DI DIGHE

Per la progettazione di dighe è necessario lo studio integrato di diverse discipline come:

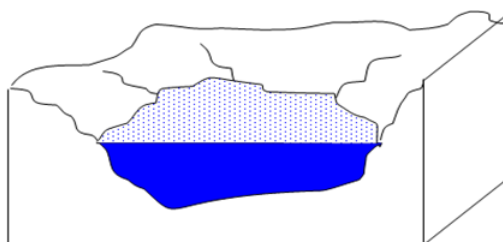
- Geologia tecnica: che si occupa dei cedimenti della soglia e delle spalle e dei franamenti delle sponde
- Idrogeologia : che si occupa dell'infiltrazioni e perdite dalla sponde, dell'estinzione delle falde e delle sorgenti a valle
- Idrologia: si occupa della sedimentazione in eccesso nel bacino e delle variazioni di portata a valle
- Morfologia: si occupa delle variazioni degli alvei a valle e delle alluvioni fangose durante gli svuotamenti



Le opere non sono solamente costituite dalla diga e dalle sue parti, ma anche dalle gallerie di derivazione, dalle opere idrauliche annesse (canali, ponti-canale ecc.), dalle strade di accesso, dai cunicoli scavati nelle rocce per le osservazioni sul comportamento degli ammassi rocciosi durante l'esercizio. Tra questi particolare interesse rivestono le **gallerie di derivazione**, che corrono nella roccia che forma il versante sottoposto alla pressione delle acque del serbatoio per condurle all'esterno di esso verso le centrali idroelettriche.

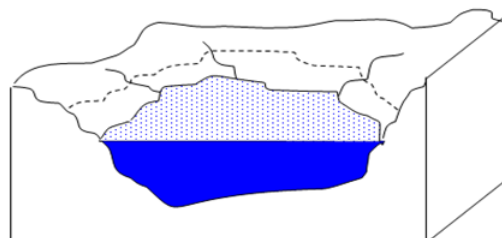
I problemi geologici connessi con la costruzione di sbarramenti (dighe, traverse ecc.) sui corsi d'acqua riguardano principalmente:

1. la tenuta dell'invaso (impermeabilità dell'invaso): La tenuta idraulica dell'invaso è il primo e più importante problema da affrontare, infatti le acque che si raccolgono a monte dello sbarramento non devono poter sfuggire lateralmente o dal fondo in quantità tali da rendere l'opera poco conveniente, dal punto di vista economico, o addirittura inutile.

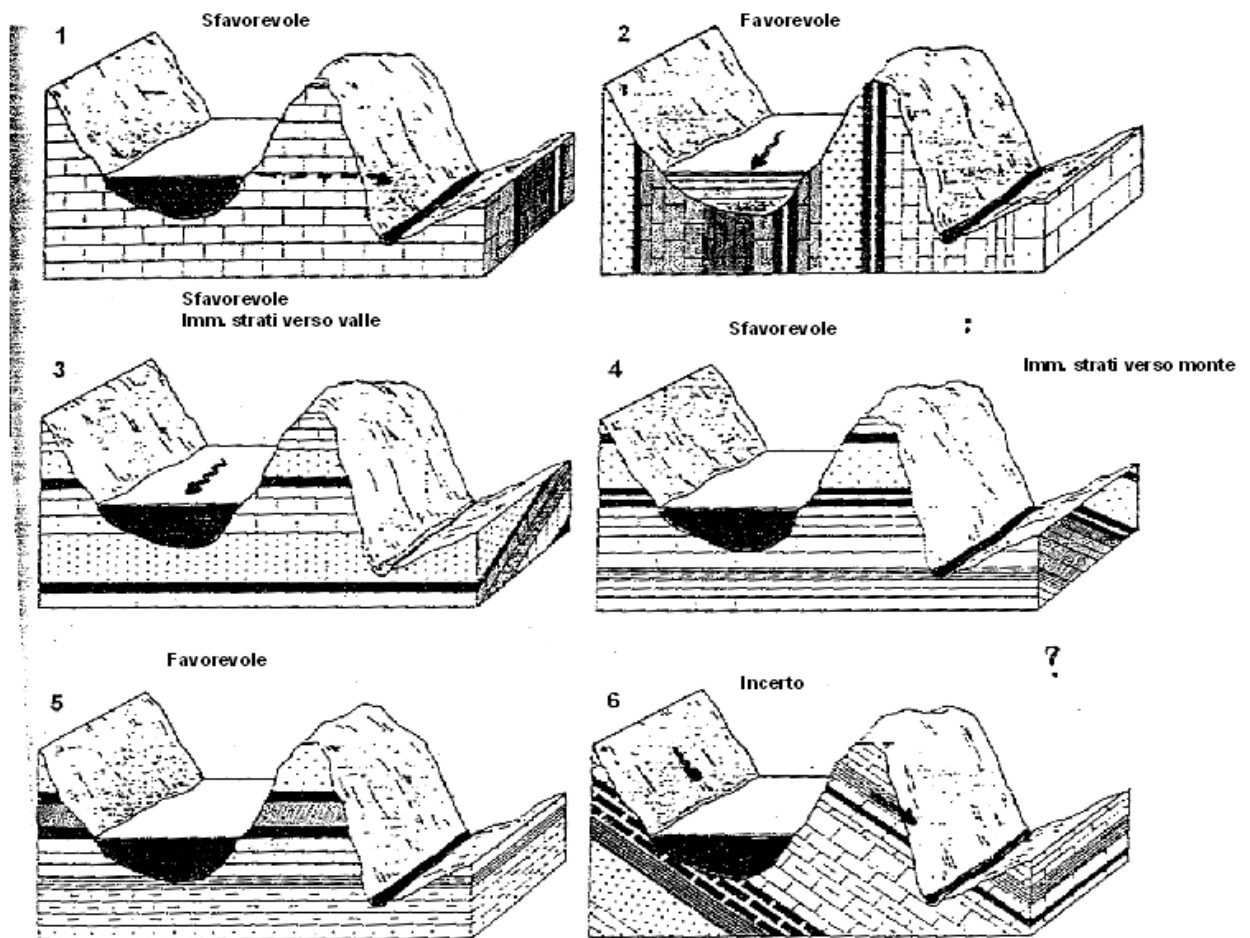


Tutta la zona d'invaso è costituita da rocce impermeabili non fessurate

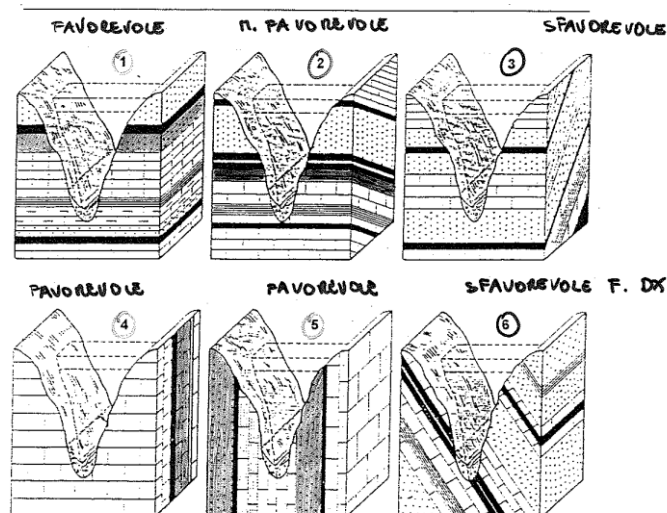
La zona d'invaso è costituita totalmente o parzialmente da materiali impermeabili



È necessario conoscere anche la disposizione dei piani di stratificazione, scistosità o fratturazione per definire i rapporti idrogeologici esistenti tra il serbatoio e le valli attigue, in quanto si possono identificare eventuali vie preferenziali di scorrimento delle acque.



2. la stabilità delle sponde e dei versanti che sovrastano l'invaso e lo sbarramento.
3. l'interramento dell'invaso.
4. l'impatto della costruzione del serbatoio sull'equilibrio idrogeologico dell'area posta a valle dello sbarramento.
5. stabilità del substrato di fondazione della diga: La stabilità del terreno di fondazione delle dighe dipende da vari fattori, quali:
 - Natura litologica del terreno di fondazione: buona parte delle rocce hanno i requisiti necessari per sostenere il carico di una diga, tuttavia rocce molto fragili, come i gessi, o soggette a fenomeni carsici, come i calcari, le dolomie, possono dar luogo a cedimenti o a crolli localizzati, causando lesioni nella struttura muraria.
 - Caratteristiche tecniche delle rocce
 - Disposizione dei piani di stratificazione, scistosità o fratturazione degli ammassi rocciosi



6. impermeabilità della soglia sulla quale va ubicata la diga: Gli studi inerenti le caratteristiche di permeabilità dei terreni di fondazione di una diga rivestono una grandissima importanza, in quanto un'errata valutazione dei valori di permeabilità o interventi di bonifica inadeguati possono portare a conseguenze disastrose (es. il crollo della diga).
7. reperimento dei materiali per il corpo della diga e per le opere connesse: La realizzazione di una diga necessita l'impiego di grandi quantitativi di materiali naturali da costruzione che, a seconda del tipo di sbarramento, devono possedere ben precise caratteristiche fisiche e meccaniche. Per le **dighe in muratura** a secco e a gravità vengono utilizzati massi e pietrame con:
- elevato peso specifico apparente
 - basso coefficiente di imbibizione
 - basso coefficiente di dilatazione termica
 - buona resistenza a compressione ($\geq 40\text{-}50\text{ MPa}$)
 - bassa gelività
 - facile lavorabilità

Per le **dighe a scogliera** è richiesto pietrame di non ben definita pezzatura derivante da rocce:

- poco alterate chimicamente
- difficilmente disgregabili

Per le **dighe in terra** la gamma di materiale utilizzato è piuttosto ampia, infatti vengono impiegati limi, sabbie e ghiaie ma soprattutto argille. Queste ultime sono particolarmente utili anche per effettuare impermeabilizzazioni e per la costruzione di diaframmi.

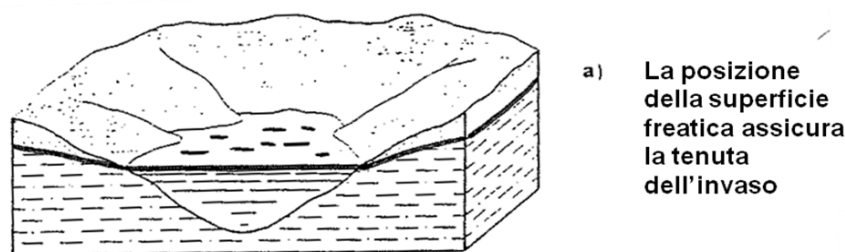
8. condizioni geologiche inerenti le opere ausiliarie, quali per esempio: canali derivatori, condotte forzate, centrali idroelettriche realizzate in sotterraneo, ecc.
- La costruzione di una diga comporta la realizzazione di una serie di opere ausiliarie ad essa connesse, quali: strade di collegamento, gallerie, canali, pozzi, caverne, centrali idroelettriche, ecc.. Le indagini geologiche necessarie per la realizzazione di tali opere sono già state descritte nei capitoli inerenti ciascuna singola opera.

È importante ricostruire **l'andamento della superficie piezometrica**. Un lago artificiale si può mantenere sul fondo di una conca non solo grazie all'impermeabilità del terreno ma anche quando tutto il sottosuolo è impregnato d'acqua fino al livello di ristagno.

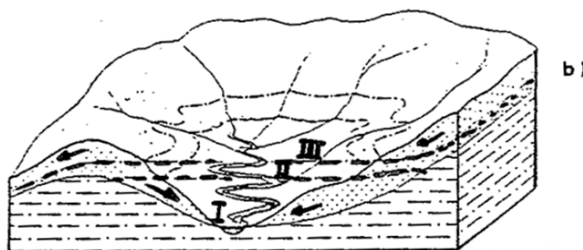
La tenuta dell'invaso è assicurata quando:

- la superficie freatica si innalza sui lati della conca sino a un livello superiore a quello di massimo invaso;
- eventuali spartiacque sotterranei sono posti sempre a quote superiori rispetto a quelle di massimo invaso per evitare che si trasformino in sfioratori.

La presenza di numerose sorgenti situate nella zona di invaso può essere un indizio favorevole, perché vorrebbe dire che almeno in parte la superficie freatica è inclinata verso il bacino. Al contrario, se la superficie piezometrica è situata a grande profondità e l'alveo è costituito da rocce non completamente impermeabili, le acque tendono a sfuggire più o meno rapidamente sia dal fondo che dai lati del bacino per raggiungere il livello piezometrico.



a) La posizione della superficie freatica assicura la tenuta dell'invaso



Il livello I indica la posizione della s.p. prima della costruzione dell'invaso; il livello II corrisponde al livello di max invaso; se si volesse arrivare al livello III, l'acqua sfuggirebbe dal serbatoio.

Lo studio geologico riguarda due fasi dell'indagine: lo studio di fattibilità e quello di progettazione vera e propria. Nel corso dello studio di fattibilità, **che è destinato alla ubicazione dello sbarramento e all'esame preliminare della idoneità dei siti prescelti**, verranno prese in considerazione le caratteristiche morfologiche favorevoli (ad esempio la presenza di un restringimento della valle) e geologiche (rocce poco permeabili e di buone caratteristiche meccaniche) e quelle sfavorevoli all' insediamento della diga, in modo da identificare i settori nei quali sussistono le migliori opportunità per l'attuazione del progetto.

A tale fine verranno discussi a livello preliminare i seguenti elementi:

- caratteri tecnici generali dell'area dello sbarramento
- impermeabilità delle spalle e del fondo
- caratteri sismologici dell'area
- stabilità dei pendii nelle condizioni di esercizio
- afflussi idrici al bacino

- entità del trasporto solido

In questa fase le indagini sul terreno sono **limitate al minimo** indispensabile, salvo la particolare attenzione che deve essere rivolta allo studio della bibliografia geologica esistente sull'area, sia per analizzare i dati geologici sul settore destinato all'invaso, sia per accertare se nel passato si sono verificati fenomeni che danno luogo a sospetti sulla sua idoneità.

Nel testo successivo, tratteremo esclusivamente degli studi che vengono svolti nel **corso del progetto esecutivo**.

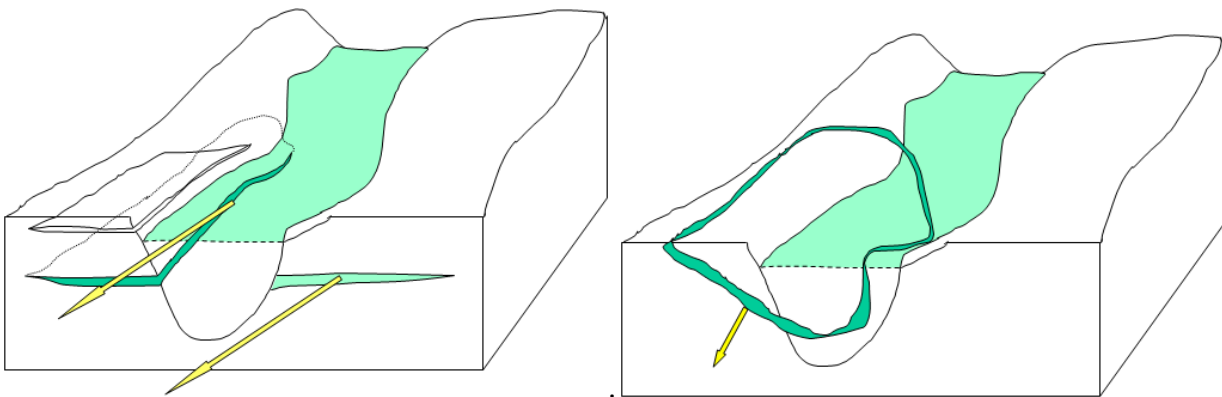
7.1. INDAGINI SULLE PERDITE DALLA SOGLIA E DAL BACINO

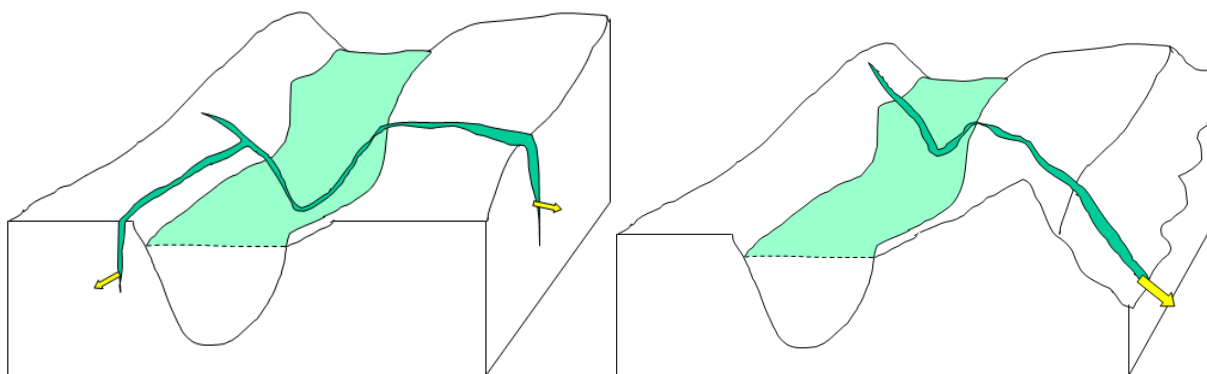
Le cause delle perdite da un serbatoio artificiale sono generalmente da collegare con la rilevante pressione idrostatica che viene a stabilirsi all'interno del bacino (in alcuni impianti lo spessore dell'invaso raggiunge e supera il centinaio di metri). L'acqua in pressione, iniettandosi entro i vuoti del terreno dei versanti e del fondo amplia le vie di flusso incrementandone con il tempo la permeabilità, determinando così perdite importanti dall'impianto, sia verso valle sia verso bacini limitrofi.

Questo fenomeno incide spesso gravemente sia sulle riserve che possono venire immagazzinate, sia sulla stabilità dei versanti e della soglia stessa della diga; per tali motivi una delle prime preoccupazioni dei progettisti quella di valutare l'entità delle possibili perdite e la loro pericolosità.

Le principali cause delle perdite dal serbatoio sono:

- lungo strato o superficie di scistosità
- lungo fratture, zone di frattura e faglia
- lungo livelli particolarmente permeabili per litologia
- per carsismo
- all'interno di depositi sedimentari clastici (alluvioni, depositi glaciali, detriti) o entro la copertura eluviale delle rocce di fondo
- entro combinazioni delle precedenti





Le combinazioni citate nell' ultimo punto possono essere tali da rendere veramente difficoltoso individuarne la pericolosità; sono di questo tipo le "reti di fratture" , i livelli permeabili per litologia che intersecano zone di frattura ponendo in comunicazione le acque del serbatoio con l'esterno ecc.

Le perdite possono essere costanti nel tempo, crescenti o decrescenti, a seconda delle cause che ne sono all'origine. Si possono citare numerosi casi di sbarramenti costruiti nelle diverse parti del mondo che non si sono riempiti o che hanno comportato eccezionali spese di impermeabilizzazione. Per evitare questi inconvenienti fondamentale che il rilevamento geologico sia accompagnato da una stima delle permeabilità delle rocce in superficie e in profondità. Questa operazione non particolarmente agevole, anche se fondata sulle analisi che sono state riassunte nella dispensa Idrogeologia generale: rilevamento geologico - strutturale, valutazione della permeabilità tramite la geometria delle discontinuità, in particolare tramite la valutazione dell'apertura media delle discontinuità, della loro frequenza e della loro giacitura.

7.1.1 IL RILEVAMENTO GEOLOGICO- STRUTTURALE

Si deve sottolineare che il rilevamento geologico - strutturale, che deve essere rappresentato alla scala 1/5.000, viene eseguito in modo particolarmente accurato, così da consentire la visualizzazione sulle carte sia delle disposizione delle fasce detritiche, alluvionali ed eluvio-colluviali, sia dell' andamento delle maggiori discontinuità (faglie e maggiori fratture). Delle diaclasi, vengono solitamente rappresentate tutte quelle che hanno dimensioni sufficienti per consentirne la rappresentazione sulle carte. Dal momento che questo dettaglio non è può spesso bastare per comprendere il comportamento dell'ammasso roccioso, indispensabile che le carte del rilevamento strutturale siano completate dai diagrammi strutturali nei quali sono indicati i poli delle discontinuità rilevate. Questi sono riportati o nella carta stessa o al suo margine.

A parte i calcoli indicati nella dispensa Idrogeologia generale, e alle indicazioni che possono essere derivate applicando le relazioni semplificative che forniscono la permeabilità in base alla geometria delle discontinuità, indispensabile che i valori della permeabilità così ottenuti siano controllati con prove di assorbimento (**Lugeon**).

Lo studio deve essere finalizzato a identificare le vie di flusso preferenziale all'interno dell'ammasso roccioso, con particolare attenzione alle possibilità di fuga dal serbatoio verso valle , verso i bacini limitrofi o verso le gallerie di derivazione.

Esso quindi viene utilizzato per delimitare i comparti rocciosi dove lo stato di fratturazione produce una permeabilità così elevata da rendere possibile una estesa circolazione idrica. Va posta quindi particolare attenzione nel concentrare le prove e le indagini sui settori nei quali il rilevamento mostra o fa sospettare una elevata permeabilità, e nel verificare che nei settori

circostanti la permeabilità sia tale da non destare preoccupazioni.

La cartografia risultante dovrà quindi essere mirata allo scopo di evidenziare con buona precisione i limiti dei settori che possono rappresentare per la loro litologia, fratturazione e permeabilità un rischio per la sicurezza, e dovrà quindi essere caratterizzata da un dettaglio particolare.

Tale rilevamento permette di posizionare con buone possibilità di successo i punti per la esecuzione delle prove di permeabilità e dei rilevamenti geosismici (preferibili quelli down-hole e cross-hole) destinati a chiarire la profondità alla quale lo stato di fratturazione si spinge.

7.2. LE STRUTTURE CAPACI DI DETERMINARE IL CEDIMENTO DELLA DIGA

Esistono numerose circostanze sfavorevoli che impediscono di comprendere con chiarezza la non idoneità delle zone prescelte nel corso dello studio di fattibilità.

Il più delle volte questi inconvenienti derivano dall'esistenza di una copertura superficiale così estesa da impedire la corretta identificazione del modello fisico del sottosuolo; altre volte dal fatto che la struttura geologica del bacino di tale complessità da dar luogo a interpretazioni erranee.

Nelle valli caratterizzate da pareti con pendenza molto elevata e strette, quindi di morfologia particolarmente idonea per le dighe, si realizza di frequente una struttura che un tipico esempio delle circostanze descritte.

In questi casi la forma della valle spesso stata modellata dall'erosione, che si è impostata lungo una zona di frattura o di faglia, successivamente coperta dai depositi alluvionali e quindi non rilevabile facilmente. La diga viene quindi a collocarsi su una fascia di rocce tettonizzate, lungo le quali si possono verificarsi cedimenti per il peso della struttura, anche per il passaggio delle acque sotterranee, che possono gravemente comprometterne la stabilità.

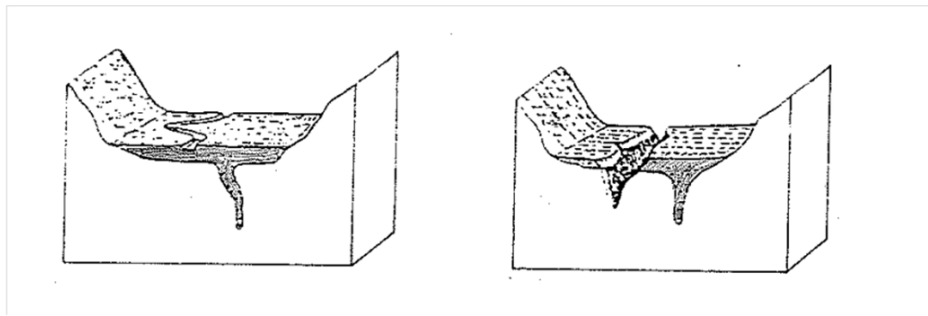
In questi casi le conseguenze sull'impianto possono essere molto gravi, e produrre costi insolitamente elevati.

Passiamo quindi rapidamente in rassegna le circostanze in oggetto, scegliendo i casi che hanno dato luogo ai danni più sensibili.

1. **presenza di un paleoalveo**: si tratta dell'alveo occupato in antico dal fiume che scorre sul fondovalle attuale, e successivamente abbandonato. Il paleoalveo risulta solitamente riempito da alluvioni discretamente permeabili, il cui substrato si può trovare ad altezza inferiore a quella del massimo invaso.

Di conseguenza, se le acque del serbatoio vengono a contatto con queste antiche alluvioni, possono facilmente uscire dall'invaso, determinando perdite rilevanti. In alcuni casi si può arrivare a conseguenze anche per la stabilità della soglia, quando il paleoalveo sia particolarmente vicino alle spalle della diga.

Queste strutture sfuggono facilmente alle osservazioni quando sono ricoperte da detriti o da morene, che cancellano completamente l'originario avvallamento in cui le acque venivano a scorrere. Se l'analisi geomorfologica non aiuta, tracce di queste strutture possono essere reperite solo con una ricerca geofisica (preferibilmente sismica), condotta appositamente.



Esempi di alvei sepolti

2. **Discontinuità coperta, livelli permeabili coperti:** il caso in cui alcune fratture non siano avvertibili dalla superficie, perché nascoste da detrito o da vegetazione. Se esse portano la roccia ad acquisire rilevante permeabilità, e se la loro giacitura lo consente, si hanno perdite anche notevoli e sensibili problemi per la stabilità.

Alcune combinazioni appaiono particolarmente pericolose, come quelle che possono generare sottopressioni; in questi casi, tipicamente rappresentati da sistemi di fratture aperte che si intersecano ad angolo ottuso sotto la diga in modo che questa ricada nel piano contenente l'asse di simmetria del diedro compreso fra le discontinuità, le spinte dal basso tendono a far "galleggiare" la diga, mettendo le acque del serbatoio in grado di vincere sul peso della struttura e di ribaltare la diga.

3. **Carsismo:** quando sono presenti forme di dissoluzione carsica di grande estensione, la permeabilità della roccia diviene tale da poter dar luogo a perdite e a cedimenti gravi. Il più delle volte la presenza del carsismo risulta chiara per la morfologia a doline e inghiottitoi che la caratterizza; in altre circostanze le superfici carsificate possono essere state ricoperte da depositi glaciali, alluvionali o detritici, e quindi non risultare evidenti al rilevamento.

In generale la possibilità di una circolazione idrica profonda può essere evidenziata tramite uno studio idrogeologico regionale, non limitato alla sola area del serbatoio, e da una accurata indagine geomorfologica che evidenzia i sintomi di attacco carsico delle rocce descritti nella dispensa sull'idrogeologia generale.

4. **Paleofrane:** in alcune valli alpine, dove nel tardo Pleistocene o comune non in epoca storica si sono verificate grandi frane che sono state ricoperte più o meno parzialmente da detriti le zone in cui si hanno consistenti restringimenti della sezione delle valli corrispondono a quelle in cui sono avvenuti i franamenti.

Posizionare una diga sugli antichi corpi di frana può evidentemente significare dar luogo a estesi cedimenti e a gravi perdite. Dal momento che tali paleofrane sono caratterizzate da giaciture molto diverse da un punto all'altro degli strati e delle superfici di scistosità, da una qualità della roccia molto bassa, e da velocità sismiche inferiori a quelle della roccia sana, occorre innanzitutto verificare se dove vengono a determinarsi tali elementi la roccia che costituisce il versante non in posto con idonei sondaggi.

Poiché momento del cedimento, la frana si è fermata sul fondovalle ricoprendone le alluvioni, se il sondaggio eseguito trova questi depositi al disotto delle rocce in studio, esse con ogni probabilità costituiscono un corpo di frana.

5. **Eluvio:** quando la copertura eluviale rilevante, e la sua base ha un andamento irregolare, solo con un buon rilevamento geosismico se ne può valutare lo spessore. In alcuni casi l'eluvio può apparire poco spesso, inducendo a evitare una profonda impermeabilizzazione della soglia e

producendo pertanto perdite e cedimenti.

Fra gli sbarramenti più costosi o mai realizzati, si ricordano i seguenti casi:

- a) la diga di *Muro Lucano*, con un massimo invaso di altezza pari a 50 m, in calcari fratturati e riempimenti argillosi saltuari, che ha registrato fin dall'inizio perdite di 200 l/s
- b) alcune dighe spagnole (*Castilloni, Jacqua, Cammarasa*). In questi casi, tutti caratterizzati da rocce calcaree carsificate, si ebbero perdite molto elevate; le prime due non furono mai riempite, mentre la terza ebbe perdite iniziali di 11 metri cubi al secondo, che furono ridotte a un quarto circa con l'impiego di 400 quintali di cemento e 1,5 milioni di quintali di altri materiali per il riempimento delle cavità.
- c) in Turchia si registrano tre casi di serbatoi mai riempiti per gli effetti del carsismo
- d) negli Stati Uniti la diga di *Fork Site* fu abbandonata dopo 5 milioni di metri cubi di scavo per analoghi motivi, mentre la diga di *Bort* in Francia subì ritardi di 5 anni nella esecuzione
- e) in Italia la diga di *S.Giuliano* subì un considerevole ritardo nel completamento per il rinvenimento di ampie cavità carsiche in profondità dopo l'inizio della costruzione dello sbarramento.

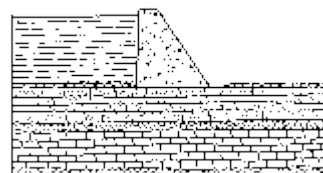
7.3. ZONE DI POTENZIALE INFILTRAZIONE

Una diga deve essere impermeabile all'acqua, pertanto tutte le possibili infiltrazioni devono essere ridotte al minimo per evitare l'indebolimento della struttura della diga stessa e le perdite.

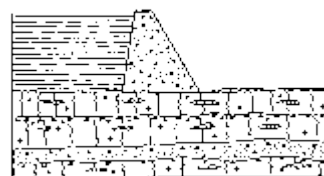
Le tipologie di zona di potenziale infiltrazione d'acqua (seepage) attraverso le rocce in prossimità di dighe, è pressoché infinito. Vengono di seguito illustrati alcuni casi descritti da *Wahlstrom E. D.* in *Dam Foundations and Reservoir Sites*.

INFILTRAZIONE NEL BEDROCK:

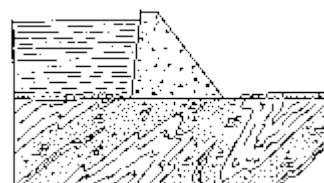
- a) potenziali infiltrazioni in arenarie fragili e fratturate nella sequenza sedimentaria orizzontale al disotto della diga



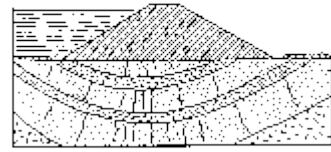
- b) La diga si trova su lava basaltica alternata a depositi piroclastici. Superiormente la lava è fratturata, brecciata e contiene grotte di scorrimento lavico.



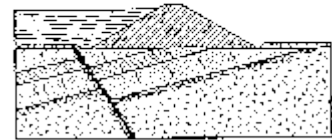
- c) Numerose fratture interconnesse in strati friabili di quarzite in rocce metamorfiche piegate.



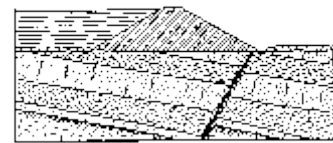
- d) Strati di arenaria alternati con strati di scisto in una sinclinale contengono diverse fratture associate allo sviluppo della sinclinale.



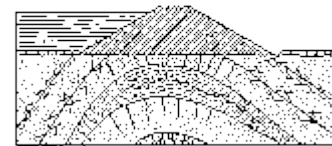
- e) Una faglia favorisce l'infiltrazione di acqua da strati di arenaria fragili che si immergono da monte.



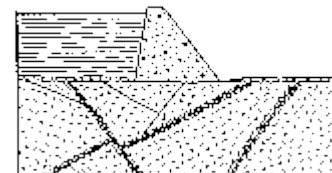
- f) Una faglia favorisce l'uscita di acqua che si muove attraverso strati di arenaria fragili ed inclinati.



- g) Strati di arenaria fragile ampiamente fratturati durante lo sviluppo di un anticlinale. Queste arenarie si intersecano a una zona di faglia, che accelera il movimento delle acque sotterranee verso la superficie al disotto della diga.



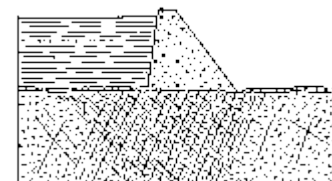
- h) Faglie in rocce cristalline fragili forniscono una via preferenziale per la circolazione delle acque sotterranee.



- i) Arenarie fratturate, una zona alterata di granito sotto i sedimenti ed una zona di faglia creano una via preferenziale per la circolazione di acqua nel sottosuolo.

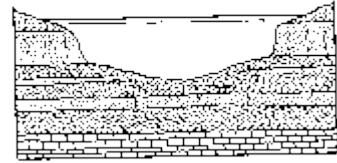


- j) Rocce cristalline ampiamente fratturate sono permeabili al flusso delle acque sotterranee.

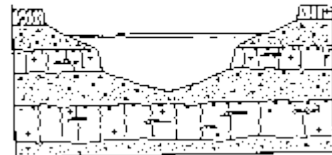


SEZIONI TRASVERSALI DELLE VALLI NEI RESERVOIR

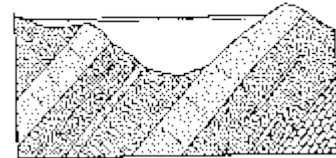
- a) Quando l'invaso è pieno le arenarie fratturate presentano potenziale di infiltrazione intorno ai pilastri della diga.



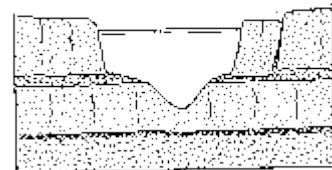
- b) Lava basaltica e strati di rocce piroclastiche creano potenziali infiltrazioni, se la lava è molto fratturata, ha in sommità delle brecce e contengono grotte di scorrimento lavico.



- c) Arenarie molto fratturate favoriscono le infiltrazioni.



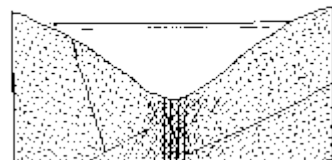
- d) Un blocco ribassato ha creato una via preferenziale in uno strato massiccio di arenaria orizzontale.



- e) Un fitto sistema di faglie rende le rocce cristalline permeabili su un lato di una valle.



- f) Una ampia zona di faglia favorisce una circolazione profonda al disotto della diga.



- g) Arenarie fratturate e una zona alterata sotto una discordanza angolare consentono una facile circolazione delle acque sotterranee.



- h) Arenarie fratturate in una anticlinale creano una zona permeabile parallela alla valle.



- i) Rocce piegate e fratturate e una grande faglia creano un potenziale per il flusso di acque sotterranee



- j) Fratture in uno strato di quarzite fragile e una faglia producono una via preferenziale per la circolazione dell'acqua sotterranea.

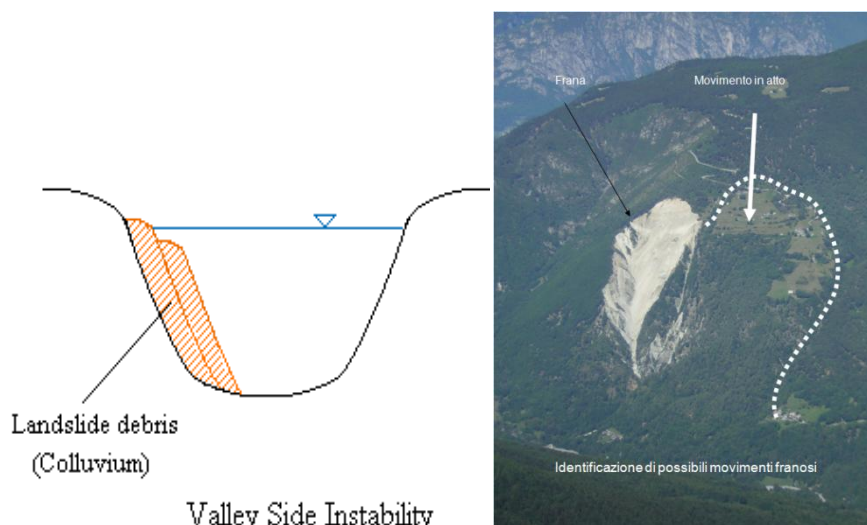


7.4. INSTABILITA' VERSANTI

La sicurezza degli invasi artificiali è garantita dal dettaglio degli studi geologici di base (rilevamento geologico, geostrutturale e geomeccanico) eseguiti e dal monitoraggio degli eventi significativi.

Particolare attenzione è da riservare a :

- Storia degli dinamica dei versanti del bacino (importanza della tettonica e dell'alterazione per le proprietà tecniche degli ammassi rocciosi; fratture di versante ed erosione sotterranea; analisi geomorfologica dei versanti e identificazione dei movimenti in atto).
- Ricostruzione della circolazione idrica sotterranea, in relazione con le variazioni piezometriche indotte dagli invasi. Effetti sulla coesione apparente prodotti dall'innalzamento del livello piezometrico. Importanza del modello concettuale della circolazione idrica sotterranea per la prevenzione dei dissesti



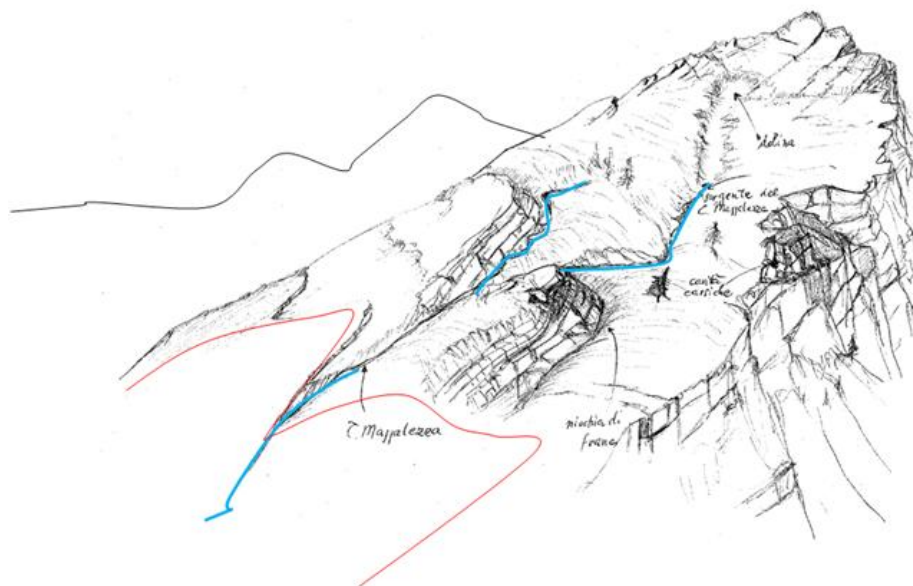
In particolare l'instabilità dei versanti ai lati di una diga rappresenta uno dei più gravi problemi che possono incorrere e che quindi devono essere evitati. Sono molto sviluppati a questo scopo sistemi di controllo in continuo che, elaborando le informazioni fornite dal sistema di monitoraggio e sono in grado di fornire:

- la **validazione** e l'**analisi** dei dati relativi allo spostamento e alla deformazione di masse;
- il **confronto** tra dati manuali e automatici;
- **archivi storici** per analisi statistiche di lungo periodo;
- **diagrammi delle misure, bollettini mensili e riepiloghi semestrali** in formato grafico e numerico;
- la documentazione necessaria agli **adempimenti** del Registro Italiano Dighe;
- **analisi periodiche interpretative**, per verificare il comportamento strutturale dell'opera;
- servizi di **manutenzione ordinaria e straordinaria** dei sistemi di trasmissione e delle apparecchiature di monitoraggio installate sulle strutture periferiche e centrali;
- servizi di **tele-assistenza** al personale tecnico in diga, per risolvere eventuali malfunzionamenti in loco.

A queste attività, si deve aggiungere la periodica sorveglianza e l'accertamento dell'eventuale esistenza di condizioni di rischio.

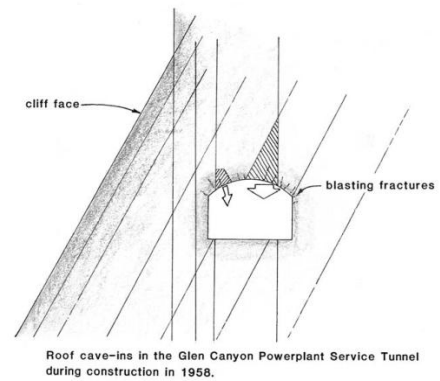
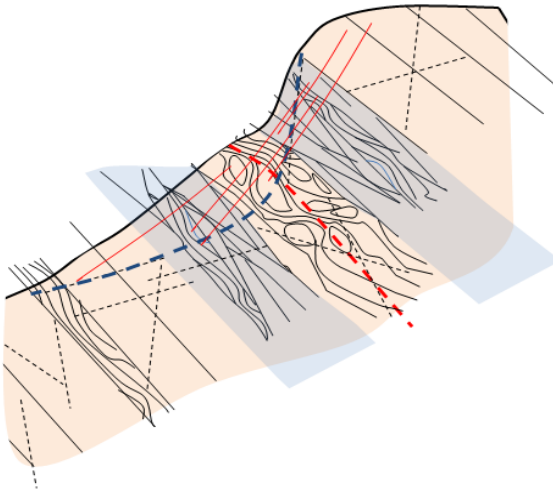
L'instabilità dei versanti ai lati della diga può essere dovuta a diversi fattori, come:

- la filtrazione produce l'instabilità delle pareti laterali, in conseguenza delle elevate pressioni dell'acqua nei giunti.
- Dove sono presenti sistemi idrogeologici carsici, l'epicarso è particolarmente spesso e diffuso e accentua i fenomeni di instabilità in quanto molta parte dell'acqua infiltrata vi si accumula. La successiva infiltrazione in profondità è in grado di determinare fenomeni di maggiore estensione e pericolosità.



La figura indica come il torrente Massalezza alimentato da un bacino carsico, disperdesse le sue acque nel corpo di frana.

- Le gallerie di by pass possono accentuare l'instabilità, per la differenza di pressione fra serbatoio e galleria. La filtrazione è accentuata dalla presenza delle discontinuità di versante.



- Le deformazioni (in specie quelle per flessione, dette di fauchage) sono congenite a un versante indebolito per alterazione o per le deformazioni tettoniche. Sul piede dei versanti agisce anche la pressione esercitata dalle masse sovrastanti, che producono fratture dette "di versante" parallele alle sue pareti, spesso molto aperte, che favoriscono la genesi di dissesti.

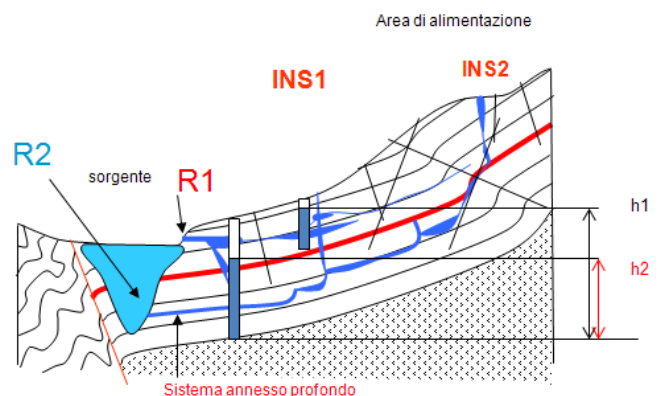
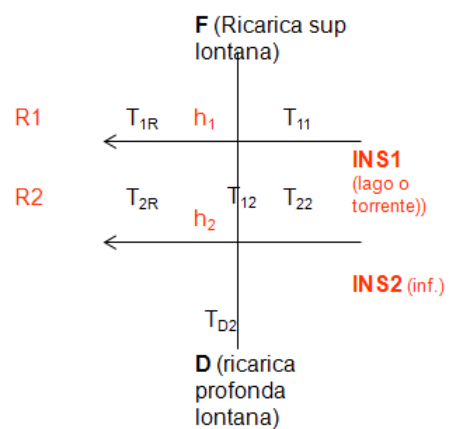
- La presenza di zone di frattura e faglie.
- livelli piezometrici: con la presenza di un acquifero profondo esiste un deflusso verso questo l'acquifero dalla superficie quando $h_2 < h_1$. Il punto di equilibrio è dato dall'uguaglianza fra h_2 e h_1 . Questo si verifica, in condizioni stazionarie, se la somma dei prodotti dei livelli piezometrici delle fonti di alimentazione per la trasmissività del secondo acquifero viene ad eguagliare quella del primo; si osserva che, aumentando R_2 , h_2 tende a superare h_1 . La relazione per l'uguaglianza dei livelli è:

$$FTf_1 + R_1 T_1 R + INS_1 T_{11} = D T_{D2} + INS_2 T_{22} + R_2 T_2 R$$

In ogni punto, l'effetto del sollevamento dei livelli piezometrici dei recapiti è calcolabile dalla relazione seguente, tramite la quale al tempo t in secondi dall'inizio dell'infiltrazione R , il livello piezometrico nel punto in studio è dato dalla relazione:

$$h'_0 = [\sum T_i h_i / A + R / A + S / \Delta t] / (S / \Delta t + \sum T_i / A)$$

- h'_0 rappresenta il valore del livello piezometrico acquisito dal punto centrale della porzione in esame dell'acquifero dopo un intervallo di tempo t , all'inizio del quale il livello piezometrico è h_i ,
- R il valore della ricarica,
- S quello del coefficiente di immagazzinamento



- T_{i0} la trasmissività della porzione di acquifero considerata e
- A la sua superficie di base.

La piezometria conserva la memoria dell'alimentazione/svaso dei mesi precedenti.

Ad esempio, si ha una relazione tra la portata Q_t della falda in fase di esaurimento e la ricarica R avvenuta nei mesi precedenti :

$$Q_t = (181.52R + 2144)e^{(-10 R \wedge 4.6)t}$$

dove Q_t è la portata falda in m^3/s al tempo t dall'inizio dell'esaurimento (espresso in giorni), mentre R è la ricarica cumulata (mm) nei mesi precedenti.

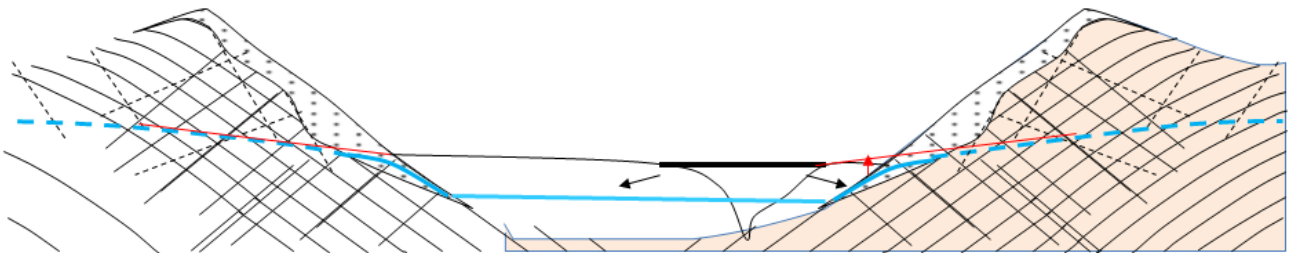
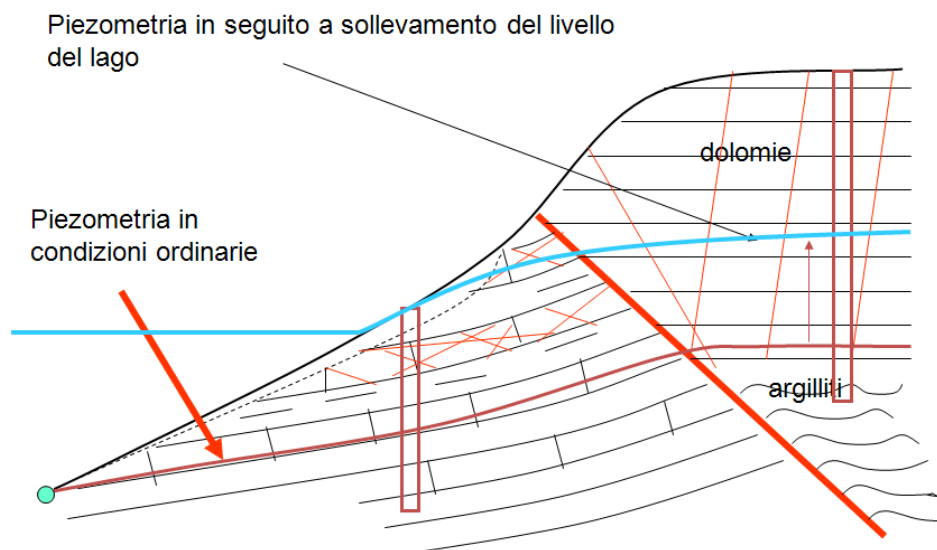


Fig. - Al riempimento del bacino, la scomparsa della coesione e la persistenza di una cadente verso valle genera instabilità dei detriti limoso-argillosi che coprono il versante



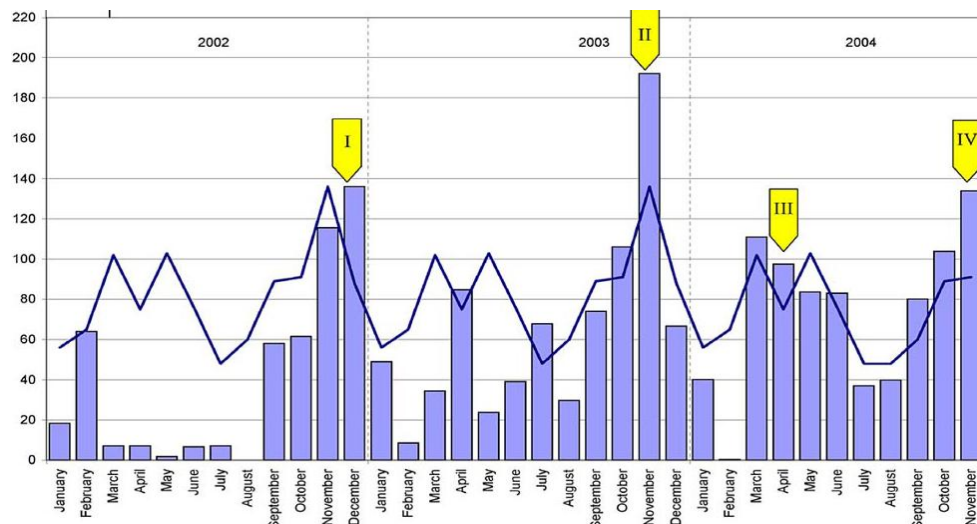
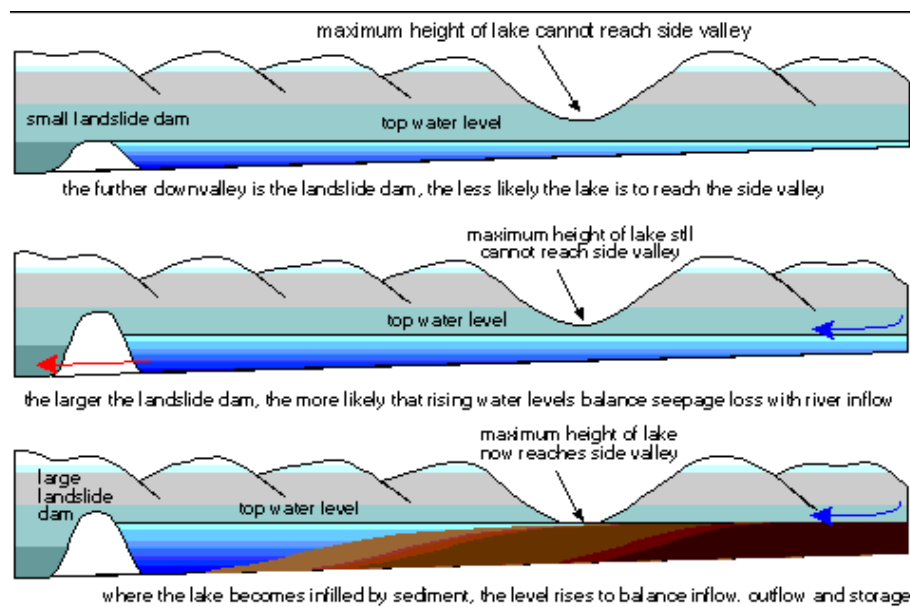
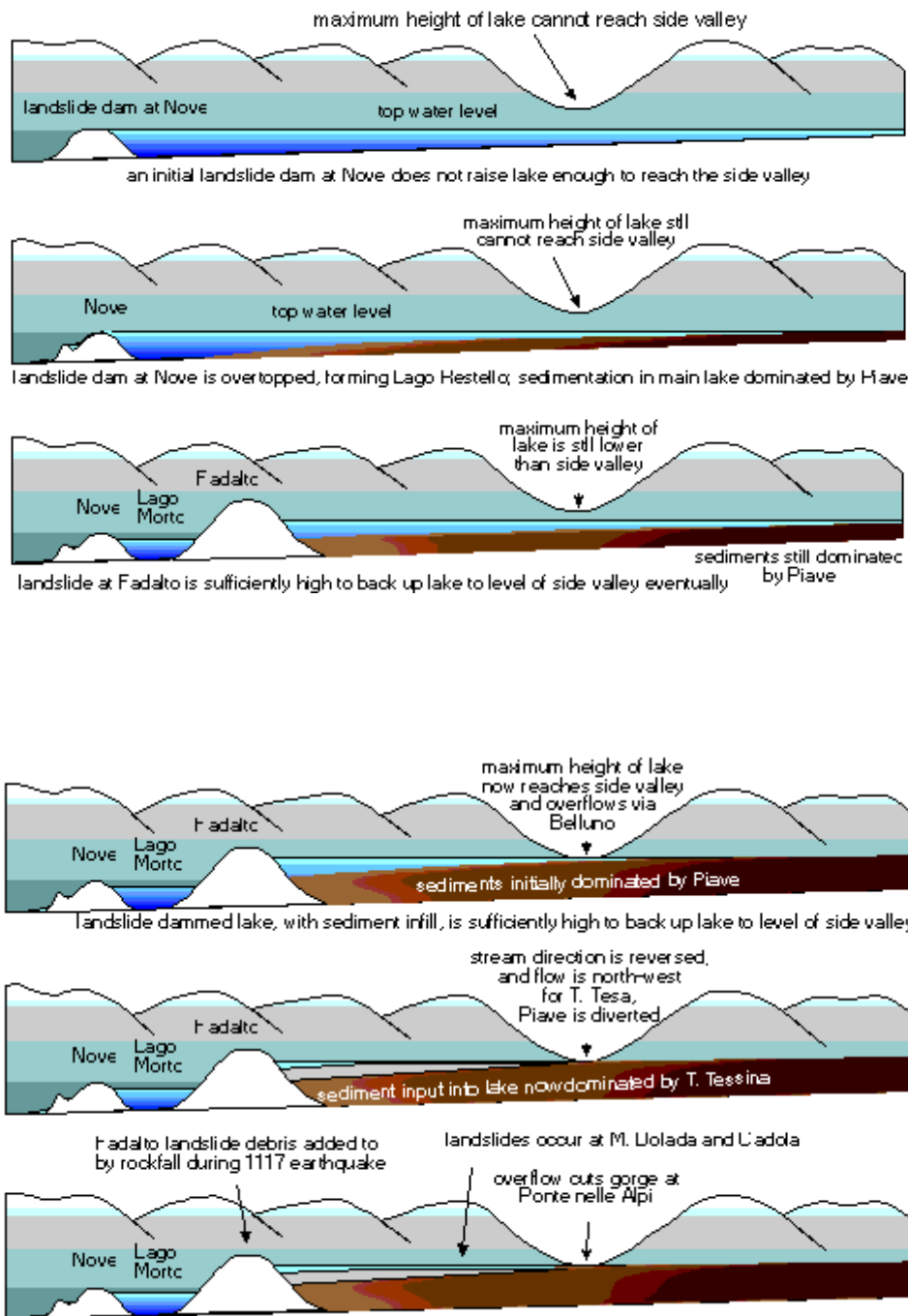


Fig.- Corrispondenza fra riattivazione delle frane (in giallo) e sollevamento della piezometria (linea blu)





7.4.1. Il monitoraggio

E' di fondamentale importanza che la sicurezza del bacino venga garantita dall'osservazione in continuo degli eventi, in particolare della velocità di spostamento dei capisaldi nei settori esposti alle frane e delle piezometria.

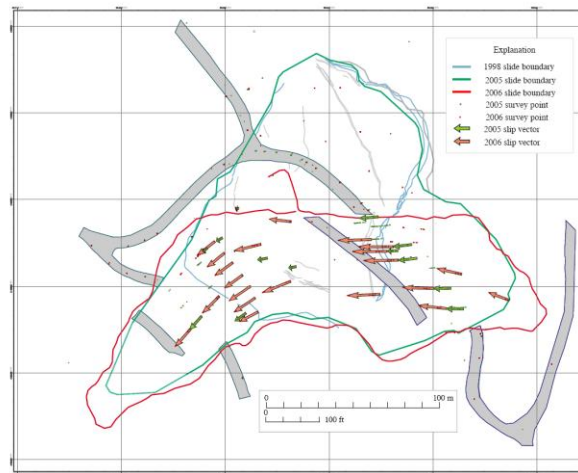
Relazione di Slingerland e Voight (1979)

$$v_s = v_0 + [2gs(\sin\alpha - \tan\phi_s \cos\alpha)]^{1/2}$$

v_s = velocità calcolata per una massa che scende lungo un piano inclinato

v_0 = velocità iniziale (0 ms⁻¹)

g = accelerazione di gravità (9.81 ms^{-2})
 s = distanza di spostamento della massa (es. 450 m)
 a = angolo di inclinazione della sup. di rottura (es. 40°)
 j_s = angolo di frizione dinamica, che tiene conto della pressione dei pori e della scabrezza, compreso fra 0.25 ± 0.15 (Slingerland e Voight, 1979). Con i numeri dell'esempio, la velocità al termine della discesa è 230 km/h.



Esempio di cartografia della velocità di moto di una frana

7.5. L'INTERRIMENTO DEL SERBATOIO

I corsi d'acqua trasportano sul fondo, in sospensione o per saltazione grandi volumi di materiale. La determinazione del trasporto solido rappresenta un punto importante per l'analisi dell'equilibrio idrogeologico di un corso d'acqua, soprattutto al fine di stabilire se l'alveo è in erosione o in sovralluvionamento.

Lo scopo che ci si propone in generale quello di individuare il profilo di equilibri o di compensazione, cioè la pendenza adatta a impedire che sovralluvionamento ed erosione si manifestino.

Diversi metodi sono stati proposti per valutare il trasporto solido.

In particolare si utilizza il metodo di **Einstein** semplificato per valutare, in base ai dati raccolti in alcune parti del corso d'acqua, il trasporto solido nelle altre parti; tuttavia il metodo appare valido solamente per le condizioni di flusso che predominano al momento in cui viene effettuato il campionamento.

Altri metodi sono validi solamente per corsi d'acqua di grande profondità e larghezza (Toffaletti) o piccoli corsi d'acqua (Colby).

I metodi di Ackers e White appaiono i più utilizzabili, purché i campionamenti siano accurati e fitti, in modo da avere dati ricavati in un gran numero di condizioni idrologiche.

I risultati devono inoltre essere verificati sperimentalmente.

I valori ricavabili con le relazioni di Meyer-Peter e Muller, secondo gli studiosi del settore, risultano molto attendibili solamente per corsi d'acqua ghiaiosi, senza sedimenti più fini.

Riportiamo solo a scopo di orientamento la relazione di Ackers e White, che si basa sulla determinazione della velocità di taglio U^* (shear velocity), pari alla radice quadrata del rapporto γ/g , in cui m rappresenta lo sforzo di taglio del fluido sul materiale dell'alveo e γ_f la densità del fluido.

m a sua volta calcolabile dalla relazione: $m = \gamma_s RS$, con γ_s pari alla densità del solido, R il raggio idraulico e S la pendenza dell'alveo.

La relazione di Ackers e White consente il calcolo di C , concentrazione media della torbida in peso del solido:

$$\gamma_f * C^* D / \gamma_s d * ((U^*/U)^{C'} = C''(-1+F'/C''')^{C''''}$$

dove:

$$F' = U * C' / A [U / (5,5 * \log(10D/d))]^{1-C'}$$

$$A = [d(\gamma_s - \gamma_f) / \gamma_f]^{0,5}$$

C', C'', C''', C'''' sono funzioni della granulometria dei sedimenti, che dipende da K

Questo parametro si può calcolare dalla relazione:

$$K = [(\gamma_s - \gamma_f) / (V^2 \gamma_f)]$$

Per K compreso fra 1 e 60 i valori che si possono attribuire ai coefficienti sono:

$$\begin{aligned} C' &= 1 - 0,56 \log K \\ C'' &= 10 * [2,86 \log K - (\log K)^2 - 3,53] \\ C''' &= (0,23 / K^{0,5}) + 0,14 \\ C'''' &= 9,66 / K + 1,34 \end{aligned}$$

Quando K supera 60 si possono assumere i seguenti valori:

$$C' = 0, C'' = 0,025, C''' = 0,17, C'''' = 1,50$$

D la profondità del corso d'acqua, d il diametro medio dei granuli, γ_f il peso specifico del fluido, V la viscosità cinematica dell'acqua ($834,167 \text{ m}^2/\text{s}$ a 20°)

I depositi trasportati dai corsi d'acqua finiscono con depositarsi nel bacino artificiale, dal quale devono essere eliminati tramite apposite canalizzazioni (sghiaiatori) e con l'apertura periodica degli scarichi di fondo. Non tutto il materiale può essere eliminato con questi rimedi, che peraltro devono essere attuati con cautela per le conseguenze che un afflusso eccessivo di materiale comporta per le aree poste più a valle. Una gran parte rimane sul fondo, da quale deve essere estratto con apposite escavazioni. In alcuni casi queste operazioni si rivelano molto costose, così da essere irrealizzabili quando l'afflusso di sedimenti (in specie limi e argille) molto rilevante.

Molti bacini artificiali nelle aree appenniniche sono stati resi inutilizzabili dagli effetti del trasporto solido. Citiamo a titolo di esempio di bacino compromesso quello di S.Maria in Val di Taro, che sottende un bacino costituito in gran parte da flysch e da argille scagliose, attualmente ridotto a un volume disponibile di 120.000 metri cubi contro gli originari 220.000.

Uno studio di S. Gervasoni (Un.di Pavia, tesi di dottorato, 1987), raccoglie i dati su questi fenomeni, esponendo anche una sintesi delle indagini finora compiute.

Pozzi R.(1992) propone di prendere in considerazione il metodo di Gavrilovic al fine di determinare il trasporto solido. Gavrilovic (1972) valuta la produzione media annua in mc di sedimento con la seguente formula:

$$W = T * h * \pi * F * Z^{3/2}$$

W è la perdita di suolo media annua in mc T è il coefficiente di temperatura

$$T = [(t'/10) + 0.1]^{1/2}$$

con t' temperatura annuale media; h è la precipitazione annuale media in mm; F è la superficie del bacino in Km²; Z è il coefficiente di erosione relativa determinabile con la seguente espressione:

$$Z = X * Y * (G + Im^{0.5})$$

X è un fattore di protezione del suolo ,Y è un fattore geolitologico di erodibilità del suolo, G è un fattore che esprime i processi geomorfologici erosivi e la loro intensità Im è la pendenza media del bacino. L'attribuzione dei valori ai coefficienti X,Y e G avviene mediante l'uso di tabelle proposte dagli autori (Zemljic 1971) e sulla base di stime delle superfici dei diversi bacini in funzione dei fattori uso del suolo e/o copertura vegetale, geologia, processi geomorfologici.

Il fattore X è da determinare quindi per ogni area di studio, e qui si riporta il caso studiato da Di Gregorio e al. (2011) per un'area sarda.

Valori del fattore di protezione del suolo X		
Bacino idrografico prima degli interventi contro l'erosione		
CODICE UDS	Voci di legenda	Valore di X
11211	Residenze estive organizzate in villaggi turistico-residenziali	0,1
1122	Tessuto agroresidenziale sparso e fabbricati rurali	0,5
11212	Residenze estive raggruppate ma non organizzate in villaggi	0,25
12121	Grandi impianti di smaltimento rifiuti e depurazione acque	0
1213	Strutture turistico-ricettive (alberghi, ristoranti, etc.)	0,15
1221	Reti stradali e spazi accessori	0
1224	Impianti a servizio delle reti di distribuzione (telecomunicazioni, energia ed idriche)	0
1232	Porticcioli da diporto	0
1322	Depositi di rottami a cielo aperto	0,7
1331	Spazi in costruzione	1
1332	Fasce parafuoco	1
1411	Aree verdi urbane ed extraurbane	0,6
1412	Spazi verdi non urbani, fasce frangivento	0,85
14212	Campi sportivi (calcio, atletica, tennis, golf)	0
2111	Seminativi in aree non irrigue	0,9
2112	Prati artificiali	0,95
2124	Colture in serra	0,1
221	Vigneti	0,7
222	Frutteti e frutti minori	0,7
223	Oliveti	0,7
3222	Formazioni di ripa	0,1
32311	Macchia bassa	0,65
32312	Macchia alta	0,1

Figura 4 – Tabella dei valori del coefficiente X o fattore di protezione del suolo con descrizione del tipo di copertura e uso del suolo, associazione del codice CORINE land cover e associazione dei valori.

Dai medesimi Autori viene ripresa la tabella del fattore che esprime la dinamica dei processi

geomorfici (G) e di quello che definisce l'erosibilità del suolo (Y).

Valori del fattore esprimente i processi geomorfologici e la loro intensità erosiva G	
Processi erosivi caratterizzanti le singole aree cartografate	Valore di G
Processi di erosione costiera ed eolica	0.1
Processi di erosione areale debole	0.2
Processi di erosione areale intensa	0.5
Processi di erosione areale intensa e formazione di rivoli	0.6
Processi di erosione lineare da deflusso in talweg, di erosione di sponda e di incisione di canali	0.7

Tabella dei valori del coefficiente G o fattore esprimente i processi geomorfologici con descrizione.

Valori del fattore di erodibilità del suolo Y	
Descrizione della litologia (legenda)	Valore di Y
Sabbie dei litorali da medio-grosse a ghiaiose, sino a ghiaie. Olocene Sa	2.00
Sabbie delle dune costiere. Olocene Eol.2	2.00
Alluvioni recenti ciottolose o ciottoloso-sabbiose, prevalentemente sciolte, a elementi più o meno grossolani a diverso grado di elaborazione. Olocene Al 4	1,95
Depositi alluvionali poligenici e policiclici ben cementati con elementi poco elaborati in matrice argillo-sabbiosa, fortemente ferrettizzata. Pleistocene Al 2	1,90
Depositi alluvionali terrazzati, ghiaiosi ed argilloso-sabbiosi, con elementi mediamente elaborati, generalmente ben cementati con matrice argilloso-sabbiosa. Pleistocene Al 1	1,80
Formazione del Cixerri, depositi elastici continentali di piana alluvionale, costituiti da arenarie quarzoso-feldspatiche a grana medio grossa, stratificate e ben cementate, con intercalazioni di conglomerati poligenici argillose marnoso siltose Eocene medio – Oligocene inf? Cix	1,50
Prevalenti leucosienograniti di colore rosato, con biotite, in genere a grana equigranulare grossa; localmente più o meno alterate. Carbonifero sup. – Permiano G	0,40

Tabella dei valori del coefficiente Y o fattore geolitologico di erodibilità del suolo con descrizione del tipo di roccia – sottosuolo in funzione della legenda del dataset della geologia e associazione dei valori

In questo studio dovranno essere presi in considerazione:

- precipitazioni
- caratteri geomorfologici e di copertura vegetale del bacino idrografico sotteso dallo

sbarramento

- granulometria dei sedimenti trasportati
- litologia di superficie
- aree franose suscettibili di dare contributi al materiale alluvionale

Si potrà così pervenire a una stima della quantità di sedimento trasportato che perviene al bacino e, conoscendo i deflussi dal serbatoio e le velocità con le quali avvengono, si potrà calcolare la quantità che ne potrà uscire e la sua granulometria. Dopo un certo tempo il volume accumulato nel serbatoio tende a ridursi per effetto del progressivo addensamento naturale dovuto al carico dei sedimenti soprastanti. Alcuni Autori suggeriscono di calcolare il peso totale dei sedimenti che si accumulano in un serbatoio artificiale utilizzando la relazione:

$$W = p'W' + p''W'' + p'''W'''$$

in cui W' rappresenta la densità delle argille, W'' quella dei limi e W''' quella delle sabbie, e p le percentuali di questi materiali, e successivamente valutare la densità media dei sedimenti. Dopo T' anni di sedimentazione, avremo una densità media b data dalla relazione:

$$\hat{O} = W + 0,434K[(T'\ln T')/(T'-1)-1]$$

che dipende da K , coefficiente che, per i sedimenti sempre o quasi sempre sommersi vale zero per le sabbie, 91 per i limi e 256 per le argille. Tali stime, basate su quelle che normalmente forniscono il trasporto per sospensione e di fondo, devono essere continuamente verificate con misurazioni.

7.6. GLI EFFETTI DELL'INVASO SULLE AREE POSTE A VALLE

Importanti cambiamenti idrologici ed ecologici sopravvengono nelle aree a valle degli sbarramenti per la riduzione delle portate liquide e solide da essi prodotta.

Il pericolo maggiore tuttavia deriva dai fenomeni catastrofici che accompagnano il cedimento dello sbarramento, prima fra tutti l'onda di piena che, percorrendo ad alta velocità e con un grande volume d'acqua la valle, produce gravissimi danni su una estesa area.

Esistono metodologie molto sofisticate per il calcolo dei limiti delle aree che possono essere colpite in relazione con la scabrezza del fondo e delle ripe, della morfologia dell'alveo, del volume invasato e della forma e modalità di evoluzione del settore dello sbarramento che è soggetto al cedimento. Per un primo orientamento sulle modalità con le quali può esplicarsi in fenomeno, riportiamo la relazione di **Costa** (1985):

$$Q = 225(H.V/10 \text{ E } 6)^{0,42}$$

dove H l'altezza della diga e V il volume d'acqua invasato. Da questa si deduce che una diga alta solamente 10 m, con un volume d'invaso di soli 10.000 metri cubi può dar luogo a una portata di picco pari a 82 metri cubi al secondo, mentre una diga alta 100 m con un invasato di 100.000 metri cubi produrrebbe un'onda di piena di oltre 1500 metri cubi al secondo. E' quindi evidente che il primo provvedimento da prendere in caso di timore di rottura di sbarramenti la predisposizione a valle di essi di un alveo sufficientemente largo da contenere l'onda di piena e da smorzarne gli effetti. Per quanto riguarda gli effetti della riduzione delle portate di materiale solido e di acqua, essi vengono generalmente a tradursi in una forte erosione dell'alveo a valle della diga, determinata dal mancato apporto di materiali e dall'asportazione di quelli presenti nell'alveo e

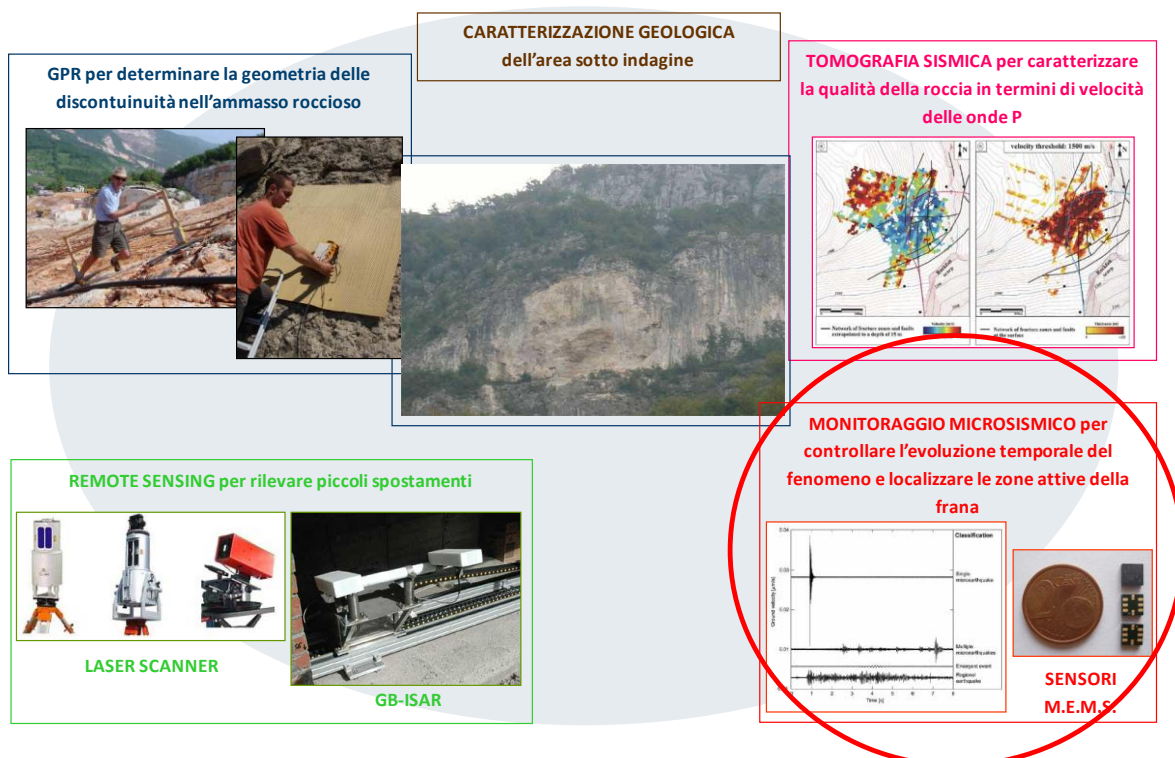
sulle ripe ad opera dello stesso corso d'acqua. Si dovrà quindi provvedere affinché i tratti più erodibili siano protetti con opere atte a ridurre la velocità delle acque a favorire la sedimentazione.

7.7. INDAGINI GEOLOGICHE DI DETTAGLIO

Allo scopo di accertare l'andamento delle discontinuità e della permeabilità, nonché le variazioni delle proprietà tecniche dell'ammasso roccioso in profondità, vengono praticati cunicoli nelle pareti rocciose circostanti la diga ed effettuate le dovute verifiche. Esse consistono:

- in prove idrauliche eseguite in modo da valutare le deformazioni indotte dall'acqua sull'ammasso roccioso, iniettando acqua in pressione e verificando con estensimetri le variazioni di forma del perforo su tutto l'anello di roccia che circonda il cavo
- esercitando con martinetti pressioni sul cavo nelle direzioni meno favorevoli (quelle corrispondenti alla giacitura delle discontinuità e delle superfici di debolezza), e valutando le deformazioni.

Queste prospezioni consentono ovviamente anche di verificare l'esistenza di strutture geologiche non prevedibili in superficie, quali diaclasi importanti, zone di frattura, cavità carsiche ecc. Esse devono essere accompagnate da perforazioni; queste saranno eseguite anche in modo da essere inclinate, per raggiungere i settori della roccia che si ritengono più problematici. Particolare cura avranno le prospezioni condotte mediante perforazioni sul fondo della valle, per accertare la presenza di strutture deboli in questa delicata posizione. Di fondamentale interesse è la prospezione geosismica, che consente una buona approssimazione dei moduli elastici delle rocce e quindi una previsione delle loro deformazioni: ove possibile saranno eseguite prove cross hole e down hole.



Effetti della riduzione delle portate su flora e fauna

La relativa mancanza di acqua può ridurre notevolmente la capacità di autodepurazione e la diluizione dei contaminanti; si dovrà quindi provvedere al mantenimento di una portata che sia almeno di poco superiore alla minima annua. Al momento attuale non esistono regolamentazioni ufficiali del problema.

7.8. CONSOLIDAMENTO DELLA SOGLIA E IMPERMEABILIZZAZIONI

Nei corsi di geotecnica il problema delle dighe in terra e delle impermeabilizzazioni estesamente trattato. Ci si limita qui ad alcuni cenni sui metodi più utilizzati di consolidamento della soglia, che consistono nelle iniezioni di malta cementizia.

Queste vengono eseguite dopo l'accertamento della permeabilità e della giacitura delle discontinuità; vanno infatti eseguite con maggiore fittezza nei settori di maggiore pericolo, corrispondenti a quelli più permeabili, possibilmente in direzione ortogonale alle superfici delle discontinuità.

La scelta dell'ubicazione e della direzione di iniezione basata quindi sui diagrammi strutturali e sulle rilevazioni della permeabilità eseguite con prove di assorbimento o indagini sul terreno.

Con queste iniezioni si tende a bloccare la circolazione idrica nelle fratture , riducendo la permeabilità al disotto di 10 E-7 cm/s .

Si mantiene come regola generale di ottenere con queste fitte iniezioni, condotte in modo da creare un ventaglio , o uno schermo protettivo, di profondità pari alla somma di $H/3 + C$, dove H l'altezza della diga e C scelto fra 7,5 e 21 a seconda della profondità dell'area permeabile.

Per calcolare la portata defluente sino alla distanza r dall'imposta, si può utilizzare la relazione:

$$Q_r/Q_{\max} = (\ln r/R')/(\ln R/R')$$

in cui $Q_{\max}$ rappresenta la portata defluente fino alla massima distanza R influenzata dall'infiltrazione e R' il raggio del contorno cilindrico impermeabile all'imposta.

7.9. ONDA DI TRACIMAZIONE

In caso di rottura della diga si crea un onda di tracimazione che viaggia verso valle. Costa ha calcolato la portata dell'onda di tracimazione Q , conseguente alla rottura della diga (dam break) come:

$$Q = 226 (H_v/10^6)^{0,42}$$