

Comitato Nazionale Italiano
delle Grandi Dighe

7

Processi di invecchiamento di dighe e loro fondazioni



Roma 1999

INDICE

<i>Presentazione</i>	5
<i>Premessa</i>	7

PARTE I

<i>Considerazioni generali</i>	9
--------------------------------	---

PARTE II

Dighe in calcestruzzo ed in muratura di pietrame e malta

A) <i>PROCESSI RELATIVI ALLA FONDAZIONE</i>	
1. <i>Deterioramento della fondazione per carichi alternati</i>	17
2. <i>Rialzo del livello di falda nelle sponde</i>	20
3. <i>Dissoluzione o erosione</i>	22
4. <i>Deterioramento dello schermo di iniezioni</i>	24
5. <i>Deterioramento della rete di drenaggio</i>	26
B) <i>PROCESSI RELATIVI AL CORPO DIGA</i>	
6. <i>Reazione alcali-aggregati</i>	29
7. <i>Attacco di acque aggressive</i>	32
8. <i>Reazioni producenti contrazioni, ritiro, fluage</i>	36
9. <i>Degrado della permeabilità</i>	40
10. <i>Degrado per variazioni di temperatura</i>	43
11. <i>Perdita di resistenza causa azioni permanenti o ripetute</i>	45
12. <i>Azione del gelo</i>	53
13. <i>Degrado del sistema di tenuta dei giunti strutturali</i>	56
14. <i>Degrado dei rivestimento di monte</i>	58

PARTE III

Dighe in materiali sciolti

A) <i>PROCESSI RELATIVI ALLA FONDAZIONE</i>	
15. <i>Perdita di resistenza, aumento di sottopressione, variazione dello stato di sforzo</i>	67
16. <i>Degrado della fondazione</i>	72
17. <i>Erosione interna</i>	74

<i>B)</i>	<i>PROCESSI RELATIVI AL RILEVATO</i>	
18.	<i>Deformazione del rilevato</i>	77
19.	<i>Perdita di resistenza</i>	79
20.	<i>Aumento di pressione interstiziale</i>	81
21.	<i>Erosione interna</i>	83
22.	<i>Degrado del rilevato</i>	85
23.	<i>Perdita di collegamento tra rilevato e struttura muraria</i>	87

PARTE IV

Opere annesse

24.	<i>Erosione per dissipazione di energia cinetica</i>	91
25.	<i>Erosione per abrasione</i>	93
26.	<i>Erosione per cavitazione</i>	95

PRESENTAZIONE

Il Comitato Italiano delle Grandi Dighe continua la sua attività editoriale con la pubblicazione del settimo volume della serie.

Questo testo, sviluppato dal Gruppo di Lavoro "Invecchiamento delle dighe" si propone di richiamare l'attenzione dei tecnici preposti su di una serie di processi di deterioramento delle dighe, già conosciuti, ma qui presentati in ordine logico e con tavole schematiche di facile e pronta lettura.

Mi auguro che questo testo possa costituire argomento di riflessione per quanti seguono le dighe in Italia, che, come è noto, hanno ormai superato da un pezzo la loro giovinezza e si avviano più o meno tranquillamente verso la seconda (se non la terza) età.

Morando Dolcetta Capuzzo

Presidente del Comitato Nazionale Italiano delle Grandi Dighe (ITCOLD)

Roma, Maggio 1999

GRUPPO DI LAVORO ITCOLD
“Invecchiamento delle dighe”

Dott. Ing. Renato Paolina
Dott. Giovanni Ceroni

Coordinatore
Segretario

Dott. Ing. Mario Appendino
Dott. Ing. Luigi Belloni
Dott. Ing. Roberto Belotti
Dott. Ing. Mario Berra
Dott. Ing. Alfredo Bianchini
Dott. Ing. Belisario Beomonte
Dott. Ing. Edmondo Carabelli
Dott. Ing. Bruno D'Ancona
Dott. Ing. Giancarlo Fanelli
Dott. Ing. Francesco Gallavresi
Dott. Ing. Camillo Linari
Dott. Ing. Alberto Scuero
Prof. Ing. Sergio Olivero
Dott. Ing. Umberto Posta
Dott. Ing. Carlo Scalabrini
Dott. Ing. Italo Vielmo
Dott. Ing. Ezio Baldovin
Dott. Ing. Giorgio Perelli

PREMESSA

Il Comitato "Ageing on dams" istituito dalla Commissione Internazionale delle Grandi Dighe CIGB-ICOLD per lo studio dei processi di invecchiamento delle dighe ed opere annesse presieduto da J.O. Pedro, Deputy Director del LNEC di Lisbona ha concluso i suoi lavori con la pubblicazione del Bollettino n. 93 "Ageing of dams and appurtenant works"(1994).

A tale Comitato ha partecipato attivamente un rappresentante del Comitato Italiano ITCOLD che ha agito anche quale coordinatore di un Gruppo di Lavoro nazionale, costituito allo stesso titolo.

Il gruppo di Lavoro ha ritenuto che dal testo del Bollettino potesse essere estratta una rappresentazione schematica a blocchi che, dando una immagine visiva della catena cause - effetti - conseguenze per i processi più pertinenti alla realtà italiana, fornisca uno strumento di prima consultazione, rimandando al Bollettino ICOLD per i successivi necessari approfondimenti.

Il presenté lavoro è indirizzato in particolare a quanti operano nel campo dell'esercizio e della sicurezza delle dighe, ed hanno quindi occasione di doversi confrontare con il fenomeno dell'invecchiamento, che è connaturato con la stessa vita dell'opera.

Sembra opportuno precisare che i processi relativi alle dighe in calcestruzzo e pietrame e malta sono stati sviluppati seguendo una impostazione europea, quelli relativi alle dighe in materiali sciolti secondo una impostazione americana.

La rappresentazione qui offerta è ovviamente perfettibile ed ampliabile, ogni contributo migliorativo sarà anzi gradito.

Il Gruppo di Lavoro era costituito da 20 persone appartenenti ad Autorità, Enti, Ditte o Studi Professionali, e portatrici di specifiche competenze nel campo delle dighe.

- Presidenza del Consiglio dei Ministri - Servizio Nazionale Dighe
- ENEL DPT-DSR-DCO
- AEM di Torino
- ISMES di Bergamo

- Università di Roma
- Imprese:
 - Consonda di Milano
 - Rodio di Milano
 - Caldart di Belluno
 - Carpi di Arona
- Studi:
 - Geotecna di Milano
 - Lotti e Associati di Roma
 - Terra Company di Milano

Un sentito ringraziamento va indirizzato ai componenti del Gruppo di Lavoro ITCOLD, per l'apporto dato alla stesura del presente elaborato.

Ing. Renato Paolina
Coordinatore

PARTE I
CONSIDERAZIONI GENERALI

L'invecchiamento è definito come quella categoria di deterioramenti, che si sviluppano nel corso del tempo in condizioni di normale esercizio dell'opera e che, provocando l'alterazione delle proprietà dei materiali del complesso diga-fondazioni, possono portare a conseguenze negative per la sicurezza dell'opera in tempi più o meno lunghi.

Le cause delle alterazioni sono insite spesso nella concezione e costruzione dell'opera. Il tempo è il fattore che condiziona l'insorgere ed il progredire delle alterazioni.

Sono quindi esclusi dalla presente trattazione gli effetti conseguenti ad azioni imprevedute od eccezionali (piene, sismi, ecc.); ed anche le situazioni, che pure costituiscono un aspetto dell'invecchiamento, in cui sia necessaria una revisione delle opere a causa dell'evoluzione dei criteri di dimensionamento, della modifica delle condizioni di carico, della variazione di normative dettate dall'Autorità.

Sono altresì esclusi dalla presente trattativa i serbatoi, relative sponde, il tronco d'alveo a valle diga, nonché le opere elettro-meccaniche.

Viene inoltre considerato come fatto giovanile dell'opera, conseguente ad approssimazione o insufficienze del progetto e della costruzione o ad operazioni di messa in servizio, il degrado che si verifichi nel primo periodo dopo la messa in carico dell'opera; in base alla esperienza acquisita, tale periodo è convenzionalmente assunto in 5 anni, dopo i quali l'esercizio è considerato normale.

L'invecchiamento comprende dunque i deterioramenti, che si verificano a partire da alcuni anni (convenzionalmente 5 anni) dopo il primo riempimento totale del serbatoio, e si estende a tutta la vita dell'opera, fino alla sua dismissione o demolizione.

Le proprietà dei materiali qui considerate sono quelle geometriche, fisiche (meccaniche, idrauliche, termiche) e chimiche (reattività, solubilità).

La conoscenza della formazione e dello sviluppo dei fenomeni di deterioramento è necessaria al fine di individuare il tipo di invecchiamento e il suo grado di sviluppo, di valutarne le conseguenze sull'agibilità dell'opera e sulla sua sicurezza, infine per decidere l'adozione di provvedimenti di risanamento appropriati.

Per "processo di invecchiamento" si intende la catena di cause ed effetti che portano come conseguenza al degrado e deterioramento delle proprietà delle opere. (Vedi Tabella 1)

Le "cause" sono i fattori che determinano le condizioni favorevoli per l'inizio e lo sviluppo nel tempo del processo e, per quanto detto, sono legate a condizioni locali (topografia, geologia, clima, caratteri delle acque,

ecc.), al progetto (concezione, geometria, specifiche, ecc.), alla costruzione (qualità dei materiali, controllo, tecnologia di lavorazione, ecc.), alla gestione (esercizio dei livelli del serbatoio, procedure operative, prove periodiche, ecc.) ed alla manutenzione. Le cause inducono sulle opere certe "azioni" ed attraverso queste influiscono sulle loro proprietà. Le azioni sono i fatti od eventi che determinano l'innesco e l'evoluzione del processo; possono essere interne alla struttura, ambientali, operative (per esempio rispettivamente: rigonfiamento del calcestruzzo, attacco chimico delle acque, energia della corrente liquida).

Le azioni producono "effetti" sia diretti (es. forze di volume e superficie, distribuzioni temperatura, filtrazioni) sia indiretti nel comportamento della struttura (es. sforzi, deformazioni, spostamenti).

Sono gli effetti a rivelare che un processo di invecchiamento è in atto.

Il perdurare delle azioni e degli effetti porta nel medio termine a conseguenze di carattere negative più o meno pronunciato (es. erosione, perdite, fessurazione); le conseguenze ultime possono essere di natura meccanica (es. ribaltamento, scivolamento, disintegrazione) o idraulica (es. sifonamento, svuotamento), ma negli schemi si è tenuto conto del fatto che, normalmente, interventi di risanamento vengono intrapresi prima.

I 26 processi di invecchiamento illustrati nel seguito sono quelli di maggior interesse per la realtà italiana fra quelli individuati dal Comitato ICOLD.

Essi comprendono:

- dighe in calcestruzzo e pietrame-malta:
 - * n. 5 processi relativi alla fondazione;
 - * n. 9 processi relativi al corpo diga;questi schemi riguardano principalmente: perdita di tenuta, alterazione di proprietà fisico-chimiche;

- dighe in materiali sciolti:
 - * n. 3 processi relativi alla fondazione;
 - * n. 6 processi relativi al rilevato;riguardano principalmente: flusso di filtrazione, assestamenti, alterazione di proprietà fisico-chimiche;

- opere annesse:
 - * n. 3 processi riguardanti l'energia della corrente liquida.

CAUSE				CONSEGUENZE	
CONDIZIONI LOCALI	PROGETTO	CONSTRUZIONE	ESERCIZIO MANUTENZIONE	a medio termine risposta negativa	a lungo termine condizioni ultime
<p>Fattori che determinano condizioni favorevoli all'inizio e sviluppo nel tempo del processo di invecchiamento</p> <p>Sono legate a condizioni locali, progetto, costruzione, esercizio</p> <p>Inducono sulle opere le "azioni"</p>				<p>Sono prodotti delle "azioni"</p> <p>Il perdurare di azioni ed effetti porta a conseguenze negative a medio e a lungo termine; le conseguenze ultime possono essere di rottura</p>	
<p>Fatti o eventi che determinano l'innescio e l'evoluzione del processo</p> <p>Influiscono sulle proprietà dei materiali e strutture</p> <p>Possono essere interne, ambientali, operative</p>				<p>Rivelano che un processo di invecchiamento è in atto</p> <p>Si hanno effetti diretti ed effetti indiretti nel comportamento di strutture</p>	

Tabella I

PARTE II
DIGHE IN CALCESTRUZZO
E IN MURATURA DI PIETRAMME
E MALTA

A) PROCESSI RELATIVI ALLA FONDAZIONE

1 DETERIORAMENTO DELLA FONDAZIONE PER CARICHI ALTERNATI

Variazioni del livello di invaso sono causa di sforzi alternati nella fondazione e di variazioni di gradiente idraulico nei giunti della roccia a monte. Alle quote di invaso più elevate, gli sforzi portano a deformazioni permanenti della fondazione, movimento dei giunti della roccia ed inizio di propagazione di fessure; il processo può essere accompagnato ed amplificato dall'alternanza di fasi di imbibizione e prosciugamento del materiale di riempimento dei giunti.

In genere la roccia è abbastanza resistente da consentire che la struttura adotti un nuovo stato di equilibrio conseguente alle deformazioni permanenti che si possono verificare dopo parecchi anni di servizio. Tuttavia in alcuni casi può persistere nel tempo una evoluzione irreversibile, come pure questa può manifestarsi dopo un lungo periodo di reversibilità.

Questo scenario si presenta principalmente su strutture sottili, fortemente sollecitate e con elevati gradienti idraulici, e su strutture a sbarramento di valli assai larghe, con elevato rapporto lunghezza/altezza.

Il carattere irreversibile del fenomeno è spesso associato ad un gradiente idraulico caratterizzato da ampie fluttuazioni; i movimenti dei giunti diventano significativi e si verifica dilavamento del loro materiale di riempimento; ciò causa deformazione permanente della fondazione o aumento dell'ampiezza dei movimenti reversibili. I relativi effetti sono:

- a monte, i giunti roccia tendono ad aprirsi sia per lo stato di sforzo, sia per la pressione idrica pari al livello di invaso;
- a valle, la roccia è assoggettata ad elevata compressione ed a sforzi di taglio, specialmente nel caso di dighe ubicate in valli larghe.

Tali variazioni di natura strutturale sono accompagnate da incre-

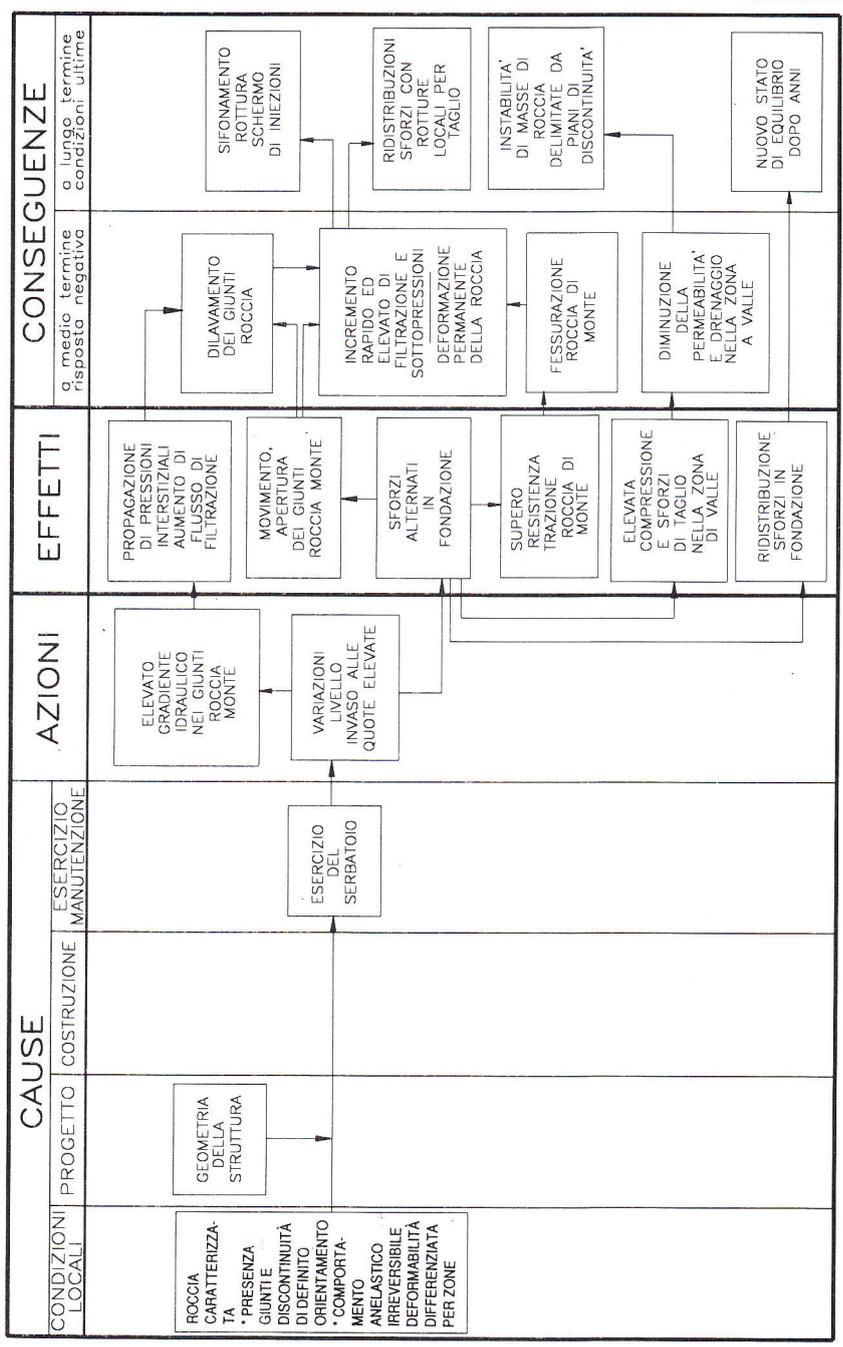
menti rapidi ed importanti della portata di filtrazione e della sottopressione. Ciò può portare a manifestazioni rilevanti di sifonamento; ad instabilità di masse di roccia delimitate da piani di discontinuità o faglie, a seguito di spinte di sottopressione; a redistribuzione di sforzi nella fondazione, con possibili rotture locali, in particolare per sforzi di taglio.

Nel caso di dighe ad arco, è ammissibile che la parte a monte della fondazione rimanga soggetta a compressione nulla ed esposta alla piena pressione idrica dell'invaso; tuttavia ciò può portare a monte alla rottura dello schermo di iniezioni ed a filtrazioni di entità non accettabile, ed a valle ad eccessivi sforzi di taglio, con impedimento della funzione di drenaggio e conseguente aumento delle sottopressioni.

DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETREME E MALTA
FONDAZIONE

PROCESSO 1

DETERIORAMENTO DELLA FONDAZIONE
PER CARICHI ALTERNATI



2 AUMENTO DEL LIVELLO DI FALDA NELLE SPALLE

Nel caso di fondazione costituita da rocce permeabili (arenarie, calcari) o da rocce caratterizzate da giunti a geometria e riempimento particolari, il riempimento del serbatoio determina la formazione di falde nelle sponde ed attorno alla fondazione della diga, ovvero l'aumento del livello di falda già esistente.

Possono passare parecchi anni, fino a qualche decennio, prima che il fenomeno si stabilizzi; limitato è l'effetto del sistema drenante della diga, tanto più se questo è di modesta estensione (es. fori corti).

Il nuovo livello idrico può determinare:

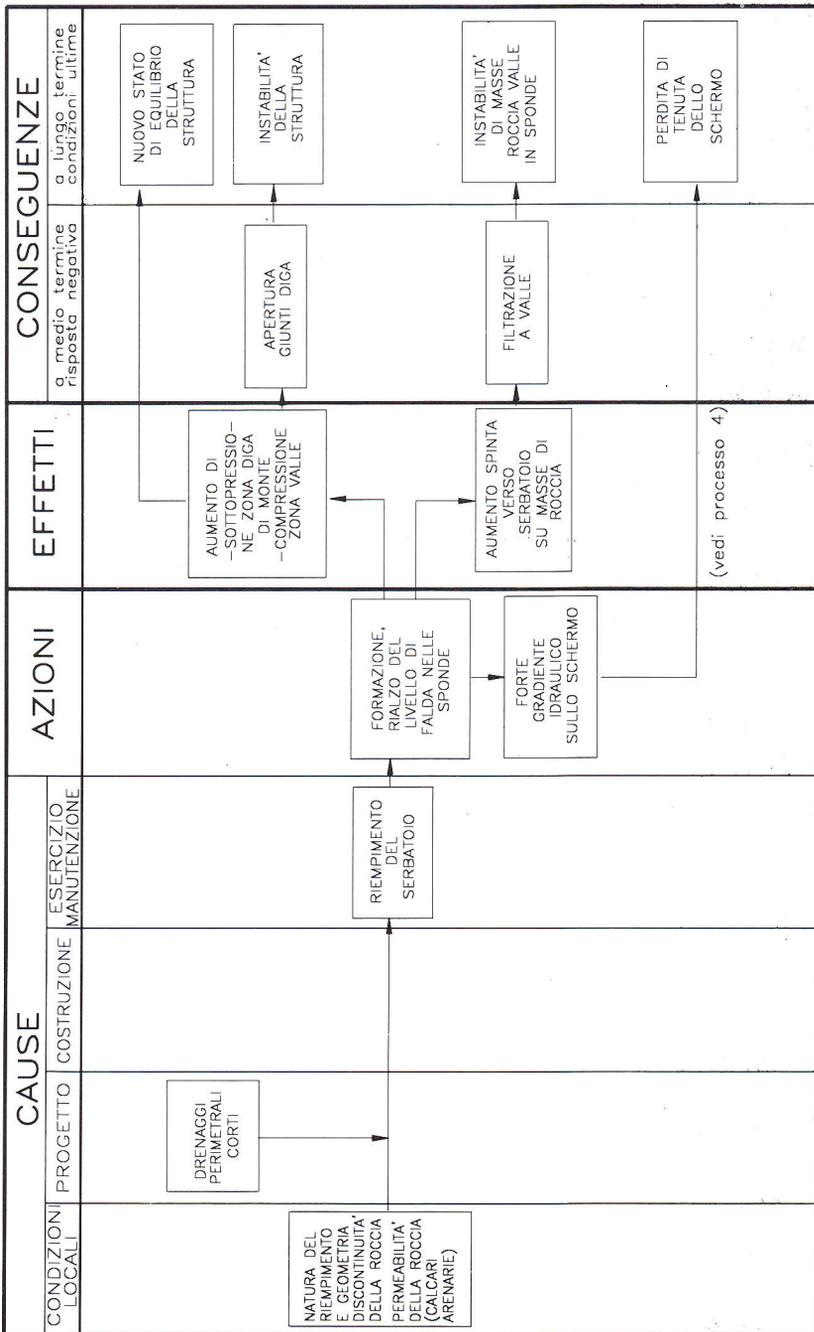
- aumento di sottopressione a monte e compressione a valle, con effetti di apertura dei giunti verticali di costruzione e conseguente tendenza ad instabilità della struttura;
- aumento di spinta nelle sponde in direzione del serbatoio e modifica dell'equilibrio di masse di roccia, in dipendenza della natura e geometria di faglie e giunti della roccia;
- forte gradiente idraulico sullo schermo e perdite della sua tenuta.

DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETRAMME E MALTA

FONDAZIONE

PROCESSO 2

RIALZO LIVELLO DI FALDA NELLE SPONDE



3 DISSOLUZIONE O EROSIONE

Il fenomeno di dissoluzione si manifesta in rocce nelle quali lo scheletro litico o il materiale di riempimento dei giunti sono chimicamente solubili a seguito dell'azione aggressiva delle acque del serbatoio ed anche delle sponde. Il venir meno di materiale solido apre la via ad un aumento del flusso di filtrazione, ed il fenomeno confluisce in quello di erosione.

Il fenomeno di erosione dipende dalla possibilità che l'acqua provochi alterazioni fisiche nella roccia a seguito della natura di queste (gesso, argilla, calcare) o della presenza di disturbi geologici (faglie, milonite) o di cavità e carsismi, con formazione di sostanze erodibili e dilavabili.

Ne consegue aumento del flusso di filtrazione ed allargamento delle vie; ciò porta al cedimento della massa rocciosa sovrastante ed a stati di sforzo inammissibili nella struttura. Ne conseguono deformazione, fessurazione e sconnessione della struttura fino alla condizione estrema della sua rovina.

I due fenomeni sono facilitati da insufficienza o perdita di efficienza dello schermo di iniezioni e del sistema di drenaggio.

4 DETERIORAMENTO DELLO SCHERMO DI INIEZIONI

L'efficienza dello schermo di tenuta, realizzato mediante iniezione di materiali entro la fondazione diga, dipende dalle sue caratteristiche (dimensioni, qualità del materiale, procedura di iniezione) in relazione alle caratteristiche della roccia (idriche, geologiche, meccaniche, chimico-fisiche).

Ove la realizzazione dello schermo sia stata inadeguata o il medesimo abbia sofferto deterioramento nel tempo, nelle discontinuità sottostanti la diga si instaura un regime di filtrazione difforme dalla normalità, esso presenta pressioni elevate immediatamente a valle dello schermo e flusso di filtrazione in aumento; ciò può determinare fuoriuscita di materiali chimici adottati nella iniezione attraverso le fessure delle rocce ed il sistema di drenaggio della diga.

Azioni di degrado sullo schermo sono comunque esercitate da:

- soluzione o erosione del materiale di iniezione;
- sforzi e deformazioni nella fondazione, dovuti alle variazioni di livello nel serbatoio. Provocano movimento dei giunti roccia, rottura della stessa e dello schermo; nel caso di dighe ad arco, si può avere rottura della parte superiore dello schermo, il sistema di drenaggio può allora entrare in contatto diretto con l'acqua del serbatoio.

In ogni caso, la conseguenza è l'aumento del flusso di filtrazione e di perdita dei dreni; perdite a valle diga possono verificarsi ed assumere una certa rilevanza economica.

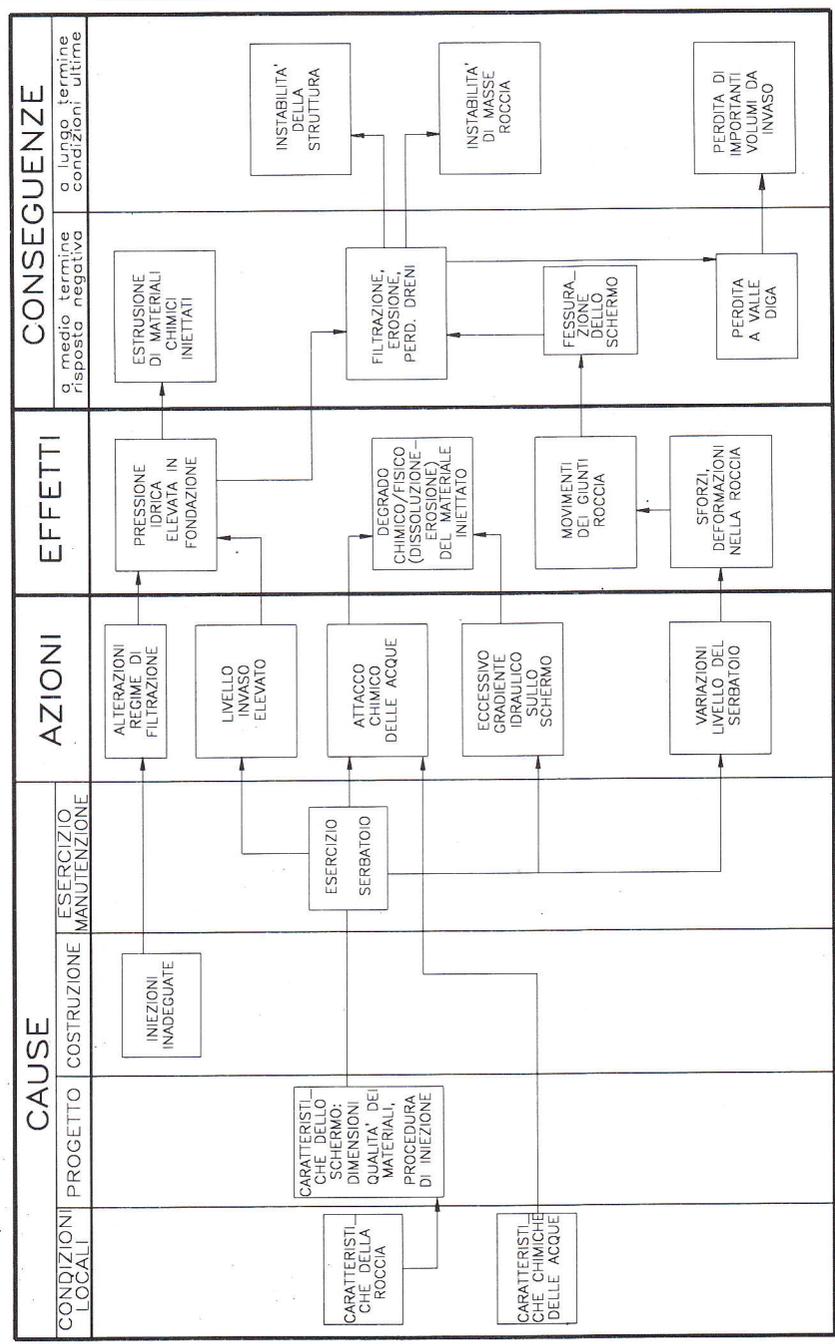
Instabilità di masse di roccia e della struttura stessa sono le situazioni che possono verificarsi a lungo termine.

Il degrado dello schermo è spesso associato ai processi 1 e 3.

DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETRAMME E MALTA
FONDAZIONE

PROCESSO 4

DETERIORAMENTO DELLO SCHERMO DI INIEZIONE



5 DETERIORAMENTO DELLA RETE DI DRENAGGIO

Il deterioramento della rete di fori di drenaggio di una diga può avvenire secondo tre principali vie:

- può avvenire che particelle di argilla o limo siano trasportate dalle acque di falda o filtrazione e decantino nei fori; che i prodotti solubili già presenti nelle acque oppure derivanti dall'attacco del calcestruzzo e cemento di iniezione, precipitino in carbonati insolubili all'interno del sistema drenante; che ioni ferro presenti nelle acque precipitino perché ossidati. In tali casi si ha formazione di depositi al fondo dei fori ed ostruzioni dei corrispondenti meati della roccia, attraverso i quali scorre la filtrazione.

Segue un aumento della pressione idrica in fondazione, di questo fenomeno tuttavia spesso non si è in grado di rendersi conto per ostruzione anche del complesso di misura, salvo l'affioramento delle acque di filtrazione a valle diga. L'instabilità della struttura e di masse di roccia a valle sono la diretta conseguenza.

Passano comunque parecchi anni prima che si verifichi l'ostruzione;

- in climi freddi, la formazione di un tappo di ghiaccio entro il foro può comportare il medesimo effetto di cui sopra. L'azione del gelo può inoltre determinare dislocazione e rottura di tubi di drenaggio ubicati sotto lastroni corredanti opere annesse (vasche di smorzamento, scivolo di sfioratori), provocando il sollevamento di questi e consentendo l'inizio di processi di erosione e sifonamento;
- una progettazione inadeguata, l'impiego di materiali (tubi, filtri) non affidabili, esecuzione di scadente qualità e mancata pulizia dei fori portano ad un regime di filtrazione alterato rispetto a quello di progetto e conseguentemente a pressioni idriche in fondazione superiori rispetto al previsto.

È anche da segnalare che il deterioramento della roccia (proces-

so 1) e la possibile rottura di schermo (processo 3) portano ad un cortocircuito delle acque del serbatoio sui drenaggi, la cui portata può aumentare rapidamente fino a valori non accettabili.

Del sistema di drenaggio possono far parte gallerie ricavate entro la fondazione, che peraltro possono considerarsi casi particolari.

B) PROCESSI RELATIVI AL CORPO DIGA

6 REAZIONE ALCALI-AGGREGATI

Deterioramento del calcestruzzo può verificarsi a causa del rigonfiamento osmotico della parte gelatinosa silico-alcalina che si forma tra gli alcali (Na_2O e K_2O) liberati dall'idratazione del cemento ed alcune rocce silicee e minerali costituenti gli aggregati. Anche gli alcali provenienti dagli aggregati possono risultare deleteramente reattivi.

I parametri chiave regolanti la RAA sono:

- a) tasso di umidità del calcestruzzo; esso è variabile: massimo sul parametro monte; vario nel corpo diga, in dipendenza della circolazione dell'acqua proveniente da monte, ma anche dalla fondazione;
- b) diffusione dell'alcali nella pasta di cemento;
- c) reattività della silice contenuta nell'aggregato.

Lo sviluppo della reazione è eterogeneo. Si verificano:

- sforzi di compressione nella direzione confinata, che è quella sp. destra - sp. sinistra su dighe rettilinee a gravità; su dighe arcuate si ha invece una certa libertà di deformazione;
- rigonfiamento con sollevamento del coronamento anche di parecchi mm/anno e suo spostamento trasversale (di norma verso monte);
- conseguentemente possono comparire fessurazioni sotto forma di ragnatela sui paramenti; inoltre su dighe rettilinee, fessure orizzontali sotto coronamento sui paramenti di valle e di monte, e più in basso sul paramento di monte; su dighe arcuate, fessure orizzontali al piede valle, che essendo vincolato alla roccia non può seguire la deformazione;
- sulla parete interna dei pozzi e canne di drenaggio, nel piano diametrale coincidente con quello di compressione destra-sinistra, si formano elevati sforzi di trazione, e conseguentemente fessure verticali, peraltro non molto profonde.

Il fenomeno è irreversibile e non si arresta spontaneamente; quale intervento difensivo è adottato, con le dovute cautele, il rivestimento del paramento di monte; si ha qualche esempio di intagli realizzati nel corpo diga al fine di conferire una capacità supplementare di deformazione.

Alcune conseguenze non sono del tutto negative:

- le fessure alte sul paramento di valle sono drenanti e ubicate in zona di resistenza generalmente sovrabbondante;
- la reazione laterale generale è fortemente stabilizzatrice; su dighe arcuate, compare un effetto volta stabilizzatore.

Conseguenze negative sono invece:

- eccessiva componente tangenziale degli sforzi di confinamento, se le sponde sono a debole pendenza; quindi tendenza della struttura a scivolare sulla fondazione;
- tendenza della struttura a scollamento e sollevamento dalla fondazione, dove il profilo della sponda presenta convessità verso l'alto;
- deformazione del calcestruzzo supportante o confinante a paratoie, specie se queste equipaggiano scarichi di superficie;
- conseguenze negative se l'orientamento delle fessure è sfavorevole e se gli sforzi nelle zone non fessurate sono troppo elevati.

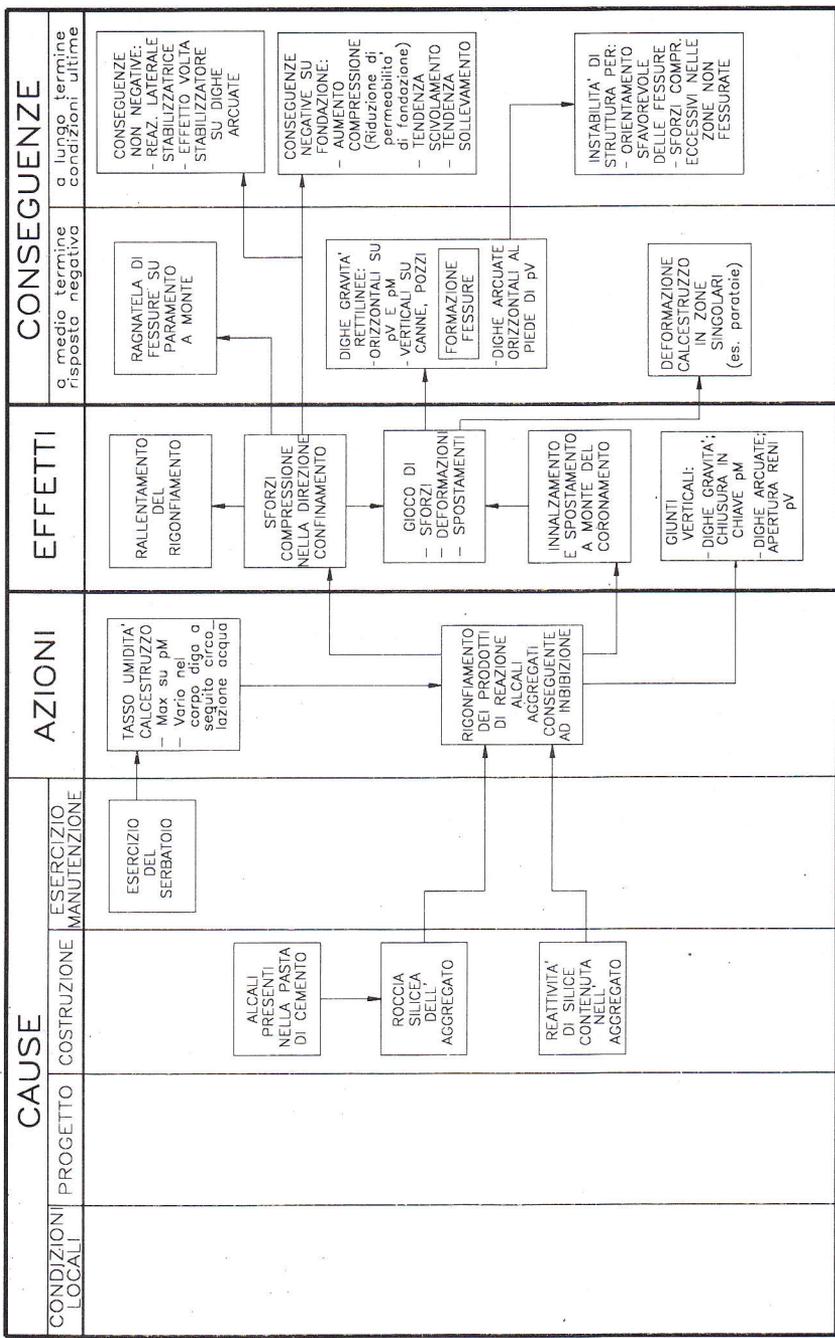
DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETRE E MALTA

CORPO DIGA

PROCESSO 6

pM = Paramento Monte
pV = Paramento Valle

REAZIONE ALCALI = AGGREGATI



7 ATTACCO DI ACQUE AGGRESSIVE

Le caratteristiche delle acque variano durante l'anno; la maggiore concentrazione di sali presenti nelle acque si ha nella stagione asciutta, ma determinante ai fini dell'attacco è il ricambio di acqua nel serbatoio, conseguente al bilancio apporti-utilizzazione. Acque aggressive possono peraltro provenire anche dalla fondazione.

L'attacco può svilupparsi anzitutto sul paramento monte, nelle aree esposte a fluttuazione del livello di invaso; nella parte più bassa della diga dove il differenziale di pressione è più elevato; indi su fessure, giunti deteriorati, passaggi d'acqua, riprese di getto; sulle zone di calcestruzzo debole o poroso, nelle zone di concentrazione delle armature.

L'attacco è facilitato dall'elevata permeabilità di calcestruzzo e malta riscontrabile su vecchie dighe.

Il flusso d'acqua da monte rimuove i prodotti dell'attacco, il ricambio di acqua fresca è in grado di rinnovarli.

I calcestruzzi e malte più esposte sono quelli di calce idraulica e di cemento Portland.

L'attacco di acque pure o contenenti solfati conduce a perdita di resistenza e peso del calcestruzzo e malta, ma in genere la diga è abbastanza massiva e può sopportare tali perdite.

Sottopressioni si formano su piani di ripresa nel corpo diga.

La perdita di peso e l'aumento di sottospinte possono risultare pregiudizievoli della stabilità nel caso di dighe a gravità.

Altra conseguenza è la corrosione di armature metalliche lasciate scoperte.

ACQUE PURE

Hanno basso contenuto di sali disciolti e presenza di anidride carbonica CO_2 ($\text{pH} < 7$), e sono tipiche di zone di montagna, dove si raccoglie acqua di neve o ghiaccio.

L'azione aggressiva consiste nelle dissoluzioni dei componenti della pasta di cemento, specie dell'idrossido $\text{Ca}(\text{OH})_2$ che è il più solubile. Questo reagisce con CO_2 presente nell'acqua o nell'atmosfera e dà carbonato CaCO_3 insolubile. La parte di CO_2 in eccesso ai fini della reazione, si combina con l'acqua e dà il bicarbonato

$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ altamente solubile e facilmente removibile.

I due processi anzidetti portano anche separatamente a decomposizione dei silicati e alluminati di calcio presenti nella pasta con formazione di ulteriore $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Tipici sono i depositi ed efflorescenze di carbonato CaCO_3 lasciati dall'acqua lungo i suoi passaggi (fessure, giunti, riprese) e nella sua venuta a giorno; per contro, tali depositi possono sviluppare azione protettiva, bloccando le vie di propagazione dell'attacco.

Anche acque neutre ($\text{pH}=7$) possono causare gli stessi danni quando il legante è debole ed è costituito da calce o miscele di vecchio tipo a base di cemento Portland.

Le conseguenze negative dell'attacco di acque pure sono: perdita di resistenza del calcestruzzo o malta; aumento del flusso di filtrazione e di sottospinta; ridotta coesione su piani interni; effetti idraulici negativi.

ACQUE CONTENENTI SOLFATI

Sotto l'attacco dei solfati, si sviluppa il seguente processo:

- trasformazione dell'idrossido di calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente nella pasta di cemento in solfato di calcio in cristalli; trasformazione degli alluminati e ferriti idratati in solfo-alluminati e solfo-ferriti. Tutti questi prodotti sono insolubili ed espansivi; le reazioni comportano rigonfiamento, che è la causa principale della perdita pressoché totale delle caratteristiche meccaniche del materiale e della conseguente disintegrazione dell'impasto nel giro anche di qualche mese o anno.
- quando è presente solfato di magnesio (acque marine), oltre che nella trasformazione precedente, esso reagisce col silicato di calcio ed abbassa il pH della pasta innescando un processo di dissoluzione dell'idrossido di calcio simile al caso delle acque pure. Si ha quindi decomposizione dei silicati di calce idrati e conseguente perdita di resistenza.

L'azione dei solfati dipende dalla loro concentrazione, dalle condizioni particolari di sito e di origine dei solfati.

Legante di elevata alcalinità favorisce l'attacco dei solfati. Quando i prodotti risultanti sono dilavabili dal flusso d'acqua, si ha un aumento della permeabilità del calcestruzzo e malta.

DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETRE E MALTA

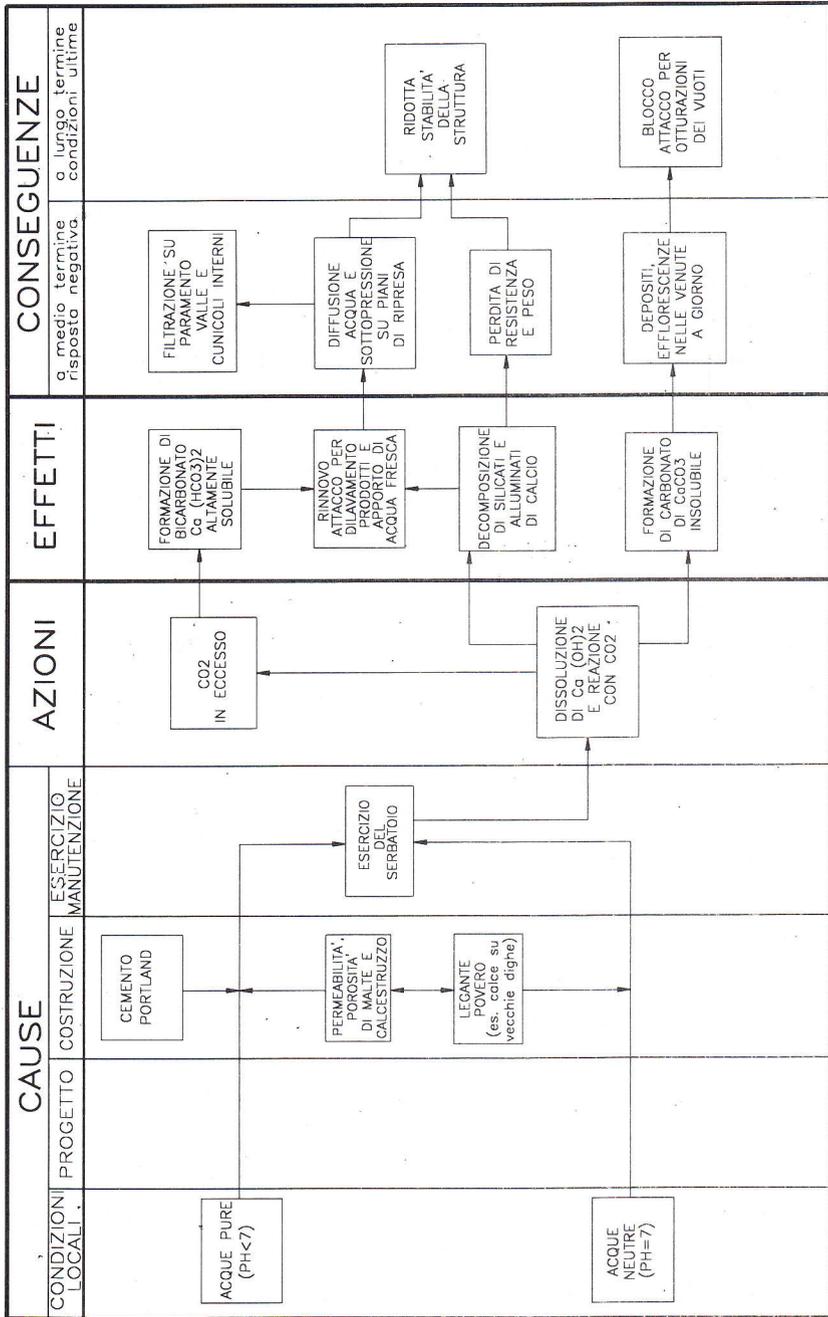
CORPO DIGA

PROCESSO

7-A

ATTACCO DI ACQUE AGRESSIVE

A) ACQUE PURE



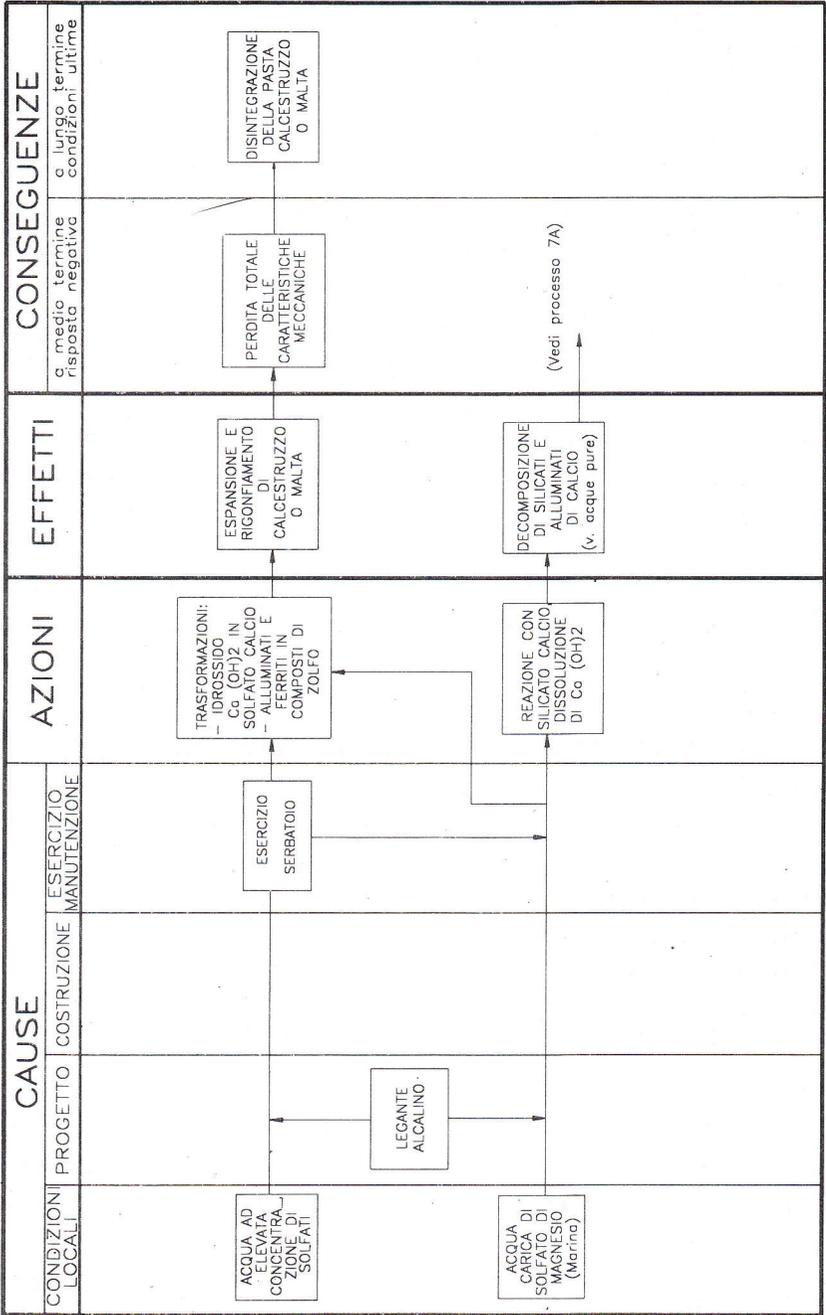
DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETREME E MALTA

CORPO DIGA

PROCESSO 7-B

ATTACCO DI ACQUE AGRESSIVE

B) ACQUE CONTENENTI SOLFATI



8 REAZIONI PRODUCENTI CONTRAZIONE, RITIRO, FLUAGE

Fenomeni interni alla massa del calcestruzzo sono causa di contrazione del medesimo. In genere sono importanti solo nei primi anni di vita della diga; questo scenario riguarda i casi in cui la contrazione continua per anni e influisce sulla struttura in modo significativo. Comprendono:

- reazioni chimiche e fisico-chimiche interne.
- scorrimento viscoso (fluage, creep): è importante solo sotto sforzi di compressione elevati e prolungati.
- ritiro: si manifesta per un periodo di qualche anno. In qualche caso però può durare ancora una o più decine di anni.

Gli effetti della contrazione sono in genere meno importanti sulle dighe a gravità che su dighe ad arco, archi multipli, speconi. La contrazione del calcestruzzo ha effetti simili a quelli di un calo di temperatura.

DIGHE AD ARCO

La contrazione per ritiro produce accorciamento degli archi. I punti di chiave subiscono uno spostamento progressivo irreversibile verso valle, con valore massimo al coronamento, che è pure sommità della mensola centrale. Si ha un basculamento delle mensole più alte verso valle, la porzione di monte della relativa fondazione viene a trovarsi scaricata; si verifica sollevamento della parte di monte del piede diga, e scollamento della fondazione su aree anche estese.

L'effetto mensola è aumentato dalla diminuzione dell'effetto arco nella parte bassa della diga. Si hanno le seguenti conseguenze:

- meccaniche: maggiori sollecitazioni di compressione sono esercitate sulla parte a valle della fondazione, la reazione d'appoggio tende a spostarsi a valle, a prendere una direzione meno inclinata rispetto al piano di fondazione e aumenta in valore assoluto.

Si ha quindi un'importante modifica delle condizioni d'appoggio della diga;

- idrauliche: nella zona sollevata di monte penetra la pressione idrostatica dell'invaso. La zona scollata può progredire fino ad interessare direttamente i drenaggi. Oltre all'aumento dei gradienti idraulici si può quindi determinare un brusco aumento delle perdite dei drenaggi con punte massime quando la diga si trova nella posizione più a valle (serbatoio pieno, stagione fredda).

La stabilità non è forzatamente messa in discussione, tanto più che le maggiori dighe sono progettate per sopportare il diagramma di totale sottospinta; ma si verificano inconvenienti pratici importanti.

Sotto il forte gradiente idraulico che si viene ad instaurare, si può verificare sifonamento di materiale di riempimento delle discontinuità della roccia e deterioramento dello schermo.

DIGHE AD ARCHI MULTIPLI

Hanno comportamento alquanto diverso dalle precedenti causa l'inclinazione della generatrice degli archi della volta (in genere) e la loro elevata altezza rispetto alla corda.

Poiché la fondazione degli archi è rigidamente vincolata, nelle sue vicinanze l'effetto arco è molto ridotto.

La tendenza a scollamento della fondazione è meno marcata.

Si ha piuttosto lo sviluppo di una certa fessurazione degli archi in fondazione, in dipendenza delle situazioni geometriche locali. Tali fessure di norma non mettono in discussione la stabilità.

DIGHE A SPERONI ED A VANI INTERNI

Nella parte inferiore, causa i legami a geometria variabile con la fondazione, i singoli speroni possono non adattarsi alla contrazione del calcestruzzo; il ritiro determina in effetti fessurazioni alla loro base.

Le fessure hanno andamento sub-verticale a partire dal piano di fondazione, si sviluppano sulle facce degli speroni o gambi e per le dighe a vani interni anche sulle facce di monte e di valle.

Le fessure sono aperte in basso, tendono a chiudere nella loro

parte alta; quelle sugli speroni o gambi possono essere passanti.

L'apertura è stabilizzata in genere dopo alcuni anni dalla costruzione, le oscillazioni successive sono dovute a variazioni termiche, per le quali si veda il processo 11. Le fessure sono giunti di costruzione naturali, auto-generati nel periodo di dissipazione del calore di idratazione e di sviluppo del ritiro. Di norma l'applicazione del carico idrico determina deformazioni dello sperone o gambo che riducono l'apertura della fessura e ne stabilizzano la evoluzione.

La nocività delle fessure dipende dalla loro geometria e dal fatto che arrivino a tagliare completamente lo sperone.

DIGHE A GRAVITÀ

Una fessurazione tipo quella degli speroni può svilupparsi all'interno del corpo diga a partire dal piano di fondazione.

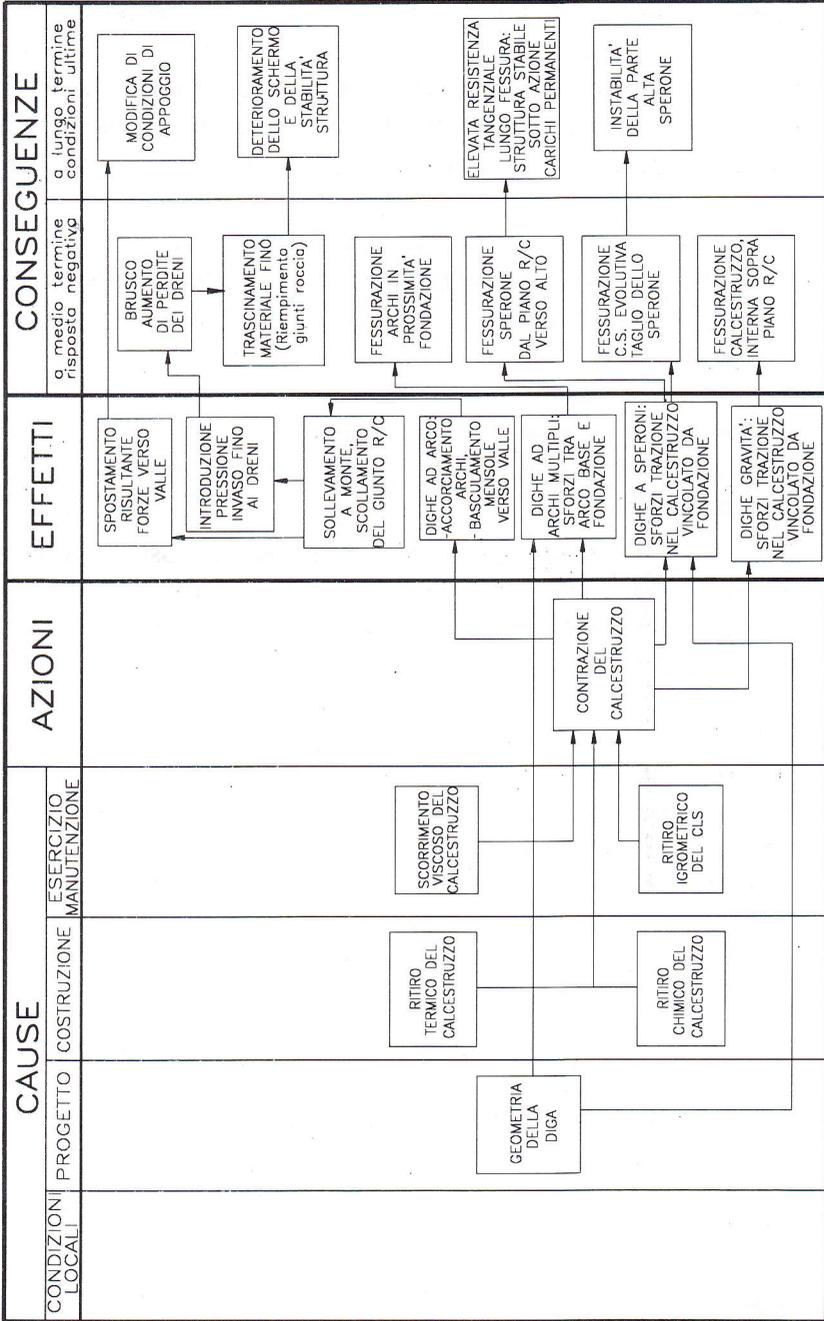
L'apprezzamento all'esterno di tale stato fessurativo è però di fatto impossibile essendo questa diga priva, per definizione, di vani interni nei quali osservare il fenomeno.

DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETRAMÈ E MALTA FONDAZIONE

PROCESSO 8

R/C = Roccio/
Calcestruzzo

REAZIONI PRODUCENTI CONTRAZIONI, RITIRO, FLUAGE



9 AUMENTO DELLA PERMEABILITÀ

L'alterazione più importante che la pasta cementizia può subire per azioni dell'ambiente esterno è quella della permeabilità, in quanto facilita la penetrazione di agenti dannosi dentro il corpo diga.

L'alterazione è più marcata sulle strutture:

- costituite da materiali inadeguati e/o messi in opera con tecnologie primitive
- sottili
- ubicate in zone a condizioni climatiche severe
- soggette ad attacco di acque aggressive.

La permeabilità intrinseca di calcestruzzo e malta dipende principalmente da:

- caratteristiche dell'impasto; compattezza, tipo e quantità di cemento, granulometria degli inerti, rapporto acqua/cemento, impiego di additivi
- metodo di posa in opera e compattamento
- modalità di maturazione.

Vecchie dighe presentano permeabilità più elevata.

La propagazione di acqua e gas entro calcestruzzo e malta è possibile se i pori sono superiori ad una dimensione minima (10^{-6} m) e se sono tra loro comunicanti.

Il meccanismo di propagazione è regolato come segue:

- si ha diffusione entro i pori collegati tra loro, e successivamente trasporto nella rete di pori;
- assorbimento capillare o a pressione idraulica.

Velocità ed entità dell'alterazione della permeabilità dipendono da tale meccanismo.

L'aumento della permeabilità è a sua volta all'origine di processi di degrado dovuti a:

- azione di agenti aggressivi esterni
- fenomeni di alterazione fisica, quale gelo/disgelo

Questi fatti a loro volta determinano ulteriore aumento della permeabilità

La permeabilità globale della massa muraria dipende peraltro da:

- permeabilità intrinseca
- presenza di fessure
- alveolature e porosità, difetti dei giunti, riprese di getto ecc...

La maggior parte delle filtrazioni riscontrabili è dovuta alle situazioni elencate nelle due ultime voci.

A seguito dell'aumento della permeabilità, filtrazioni si riscontrano sul paramento valle, specie di dighe a gravità in pietrame e malta e sull'intradosso di archi sottili in corrispondenza di riprese di getto.

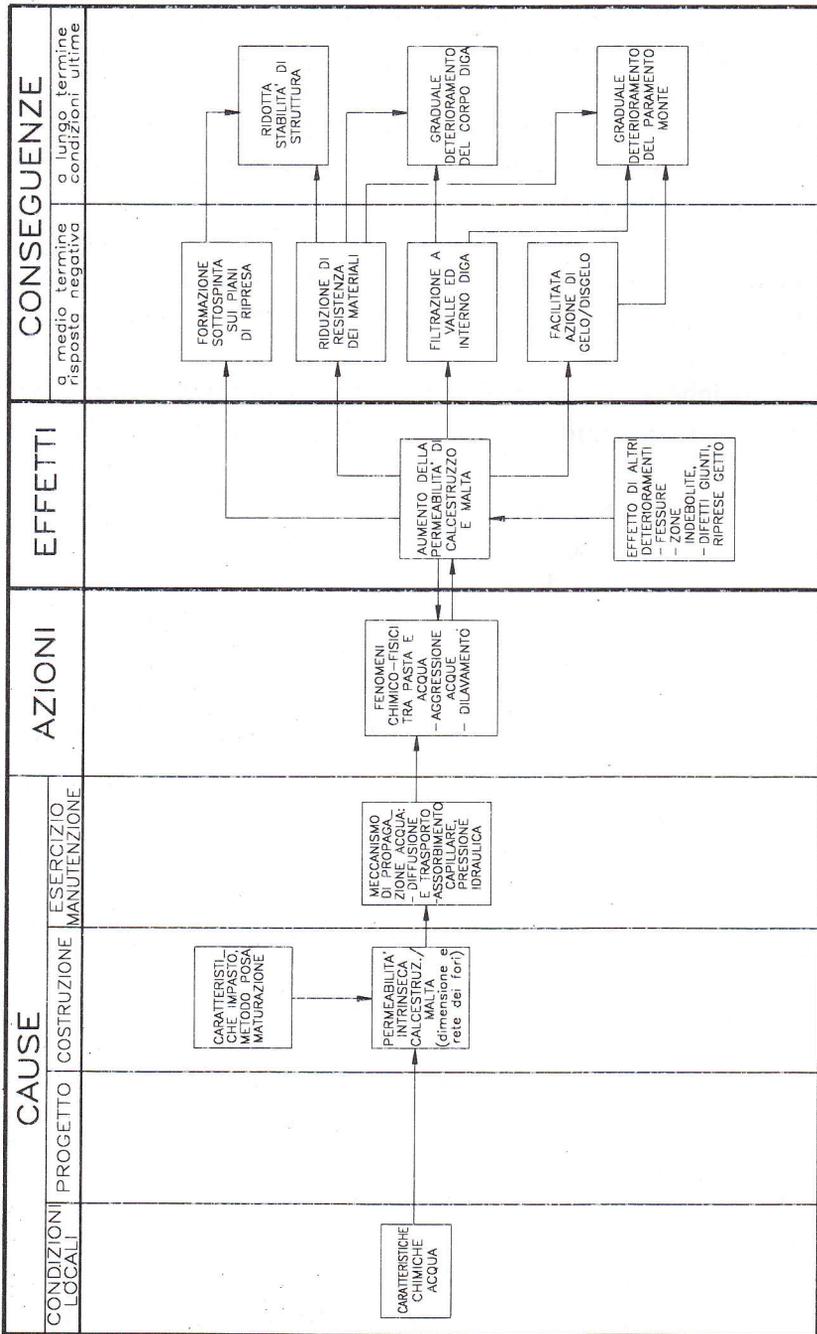
Sui piani di ripresa di getto si formano forze di sottospinta che riducono la stabilità.

AUMENTO DELLA PERMEABILITA'

DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETrame E MALTA

CORPO DIGA

PROCESSO 9



10 *DEGRADO PER VARIAZIONI DELLA TEMPERATURA ESTERNA*

Sui paramenti di dighe, emersi ed esposti a forte insolazione o in zone di clima freddo, si verificano salti termici elevati, pulsanti con frequenza giornaliera.

La temperatura del nucleo interno del corpo di una diga in esercizio è prossima a quella media annuale dell'ambiente esterno.

Tra gli strati superficiali di calcestruzzo ed il nucleo interno del corpo diga si stabilisce un gradiente termico elevato.

Poichè in fase di raffreddamento, la contrazione della pasta cementizia è maggiore di quella dell'aggregato ed è da questo impedita, la pasta risulta tesa. Anche la differenza di temperatura tra strato superficiale e nucleo interno del corpo diga induce sforzi di compressione nel secondo e sforzi di trazione nel primo.

L'inverso accade in fase di riscaldamento.

Si ha dunque, in particolare nello strato superficiale, alternanza di sforzi trazione/compressione.

Si forma fessurazione in dipendenza delle caratteristiche locali meccaniche (resistenza a trazione) e deformative (modulo elastico, fluage). L'effetto di scorrimento viscoso riduce gli sforzi di trazione.

Le fessure sono capillari, profonde pochi centimetri; possono nascere già nel primo periodo di vita del calcestruzzo e malta, favorite dal ritiro.

Si sviluppano sulla superficie del calcestruzzo con andamento ramificato, specie dove sono presenti debolezze del materiale; secondo i letti di malta e contornando le pietre, nel caso della muratura in pietrame e malta.

Su archi sottili, si ha piuttosto la tendenza ad apertura delle riprese di getto, con conseguente possibilità di travenazioni a valle.

L'azione di carichi esterni può creare concentrazione di tensioni in corrispondenza delle fessure, e favorirne la penetrazione verso l'interno diga.

Le microfessure non rappresentano pericolo statico diretto. Costituiscono però una via di più facile penetrazione dell'acqua e relativi agenti aggressivi disciolti, e facilitano l'azione disgregante di gelo/disgelo.

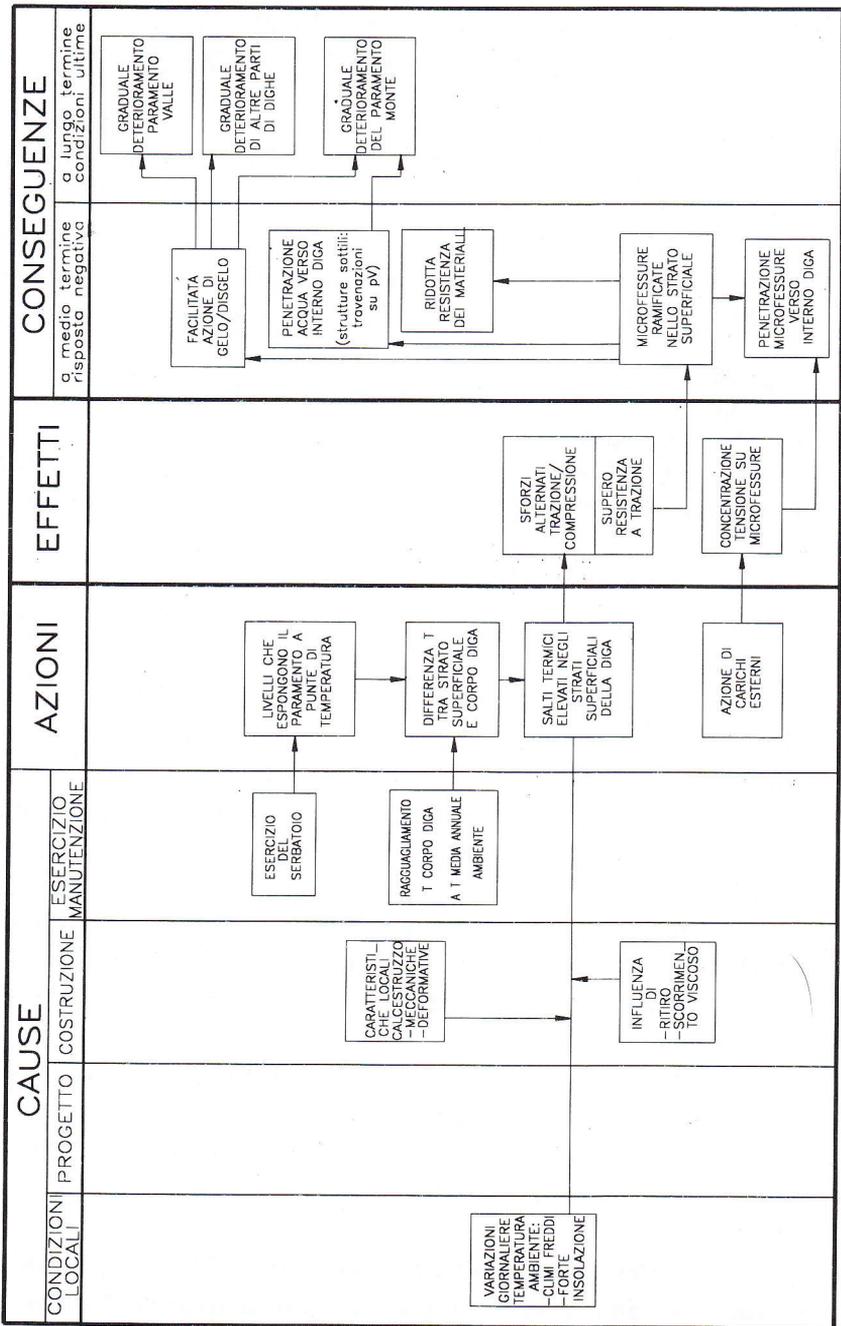
DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETREME E MALTA

CORPO DIGA

PROCESSO 10

DEGRADO PER VARIAZIONI DI TEMPERATURA

T = Temperatura
pV = Paramento di valle



11 PERDITA DI RESISTENZA CAUSA AZIONI PERMANENTI O RIPETUTE

L'inadeguatezza di alcune dighe a sopportare le azioni determinate da normali condizioni di esercizio (carico idrico e temperatura) si manifesta tramite fessurazione. Lo sviluppo di fessure comincia talvolta già durante la costruzione, ma l'influenza sul comportamento della diga può risultare significativa anche dopo parecchi anni.

Riempimento ed esercizio del serbatoio comportano un'azione permanente e ripetuta del carico idrico; essa si traduce in campi di pressione e forze che sollecitano la struttura e la sua fondazione.

La temperatura influenza il comportamento della diga in dipendenza del tipo di sbarramento, delle caratteristiche termiche dei materiali e delle variazioni della stessa temperatura ambiente.

A) DIGHE A GRAVITÀ

Le variazioni del livello d'invaso sono la principale causa che produce ripetute variazioni di spinta idrostatica e sottospinta, che sono tra le forze più importanti agenti su una diga a gravità.

Quando la sottopressione o pressione interstiziale supera le sollecitazioni indotte dai pesi verticali, si sviluppano sforzi di trazione sul paramento monte. Ove la resistenza a trazione è superata ed in assenza di appropriate armature, si formano fessure orizzontali nel calcestruzzo o si aprono i giunti tra le pietre nelle muratura.

La fessura procede gradualmente verso l'interno del corpo diga e porta a perdite anche elevate sul paramento di valle ed al relativo piede diga.

Nei casi registrati, la ragione di questo tipo di deterioramento è stata l'inadeguatezza del vecchio progetto, che non ha tenuto conto dell'effetto delle sottopressioni e pressioni interstiziali nel corpo diga.

B) DIGHE A VANI INTERNI ED A SPERONI

L'applicazione del carico idrico stabilizza l'evoluzione delle fessure sub-verticali caratteristiche di questo tipo di dighe ed illustrate

al processo 8; le variazioni termiche possono invece determinarne un progresso.

Il ciclo termico stagionale causa sul piano orizzontale dello sperone o gambo, delle sollecitazioni cicliche di flessione bi-assiale, in forza della differenza di temperatura tra superfici opposte degli speroni e tra facce esterne-interne dei vani.

La somma di tali sollecitazioni con quelle per carichi permanenti dà luogo ad elevate sollecitazioni orizzontali di trazione sulle pareti di speroni e vani.

Tali sollecitazioni, variando, inducono fenomeni di fatica sulle labbra ed apici delle fessure, e concentrazione di tensioni; sono importanti, poiché restano invariate nel loro ciclo anche dopo avvenuta la fessurazione.

Le fessure subiscono alternanza di apertura-chiusura, piccoli scorrimenti, quindi usura e logorio.

Lungo la fessura si può mobilitare un'elevata resistenza tangenziale, che è sufficiente a consentire una distribuzione di sforzi poco diversa da quella di una struttura integra.

La struttura a speroni è quindi da ritenere stabile sotto i carichi permanenti.

La struttura a vano interno, quando la fessurazione la divide in 2 semi-elementi, gode delle medesime condizioni statiche della struttura integra, salvo per quanto riguarda le azioni sismiche.

Fattori determinanti per lo stato fessurativo sono: qualità del calcestruzzo ed ubicazione in zona di elevate variazioni termiche stagionali.

C) DIGHE A VOLTA

L'inadeguatezza di dighe a volta a sopportare azioni ripetute porta ad un tipo di degrado che dà luogo ad una caratteristica fessurazione evolutiva.

Il degrado è sempre dovuto a:

- inadeguatezza del progetto, per ipotesi di calcolo poco realistiche relativamente alla fondazione o perché la struttura è troppo ardità;
- costruzione carente di buona pratica ingegneristica;

- insufficiente qualità del calcestruzzo, più spesso riprese di getto malamente saldate.

Fessure possono peraltro comparire anche su dighe ben progettate e ben costruite o essere presenti su dighe, senza che ciò costituisca reale inconveniente per la struttura.

La configurazione delle fessure può essere varia:

- fessure orizzontali, in corrispondenza di riprese di getto male saldate
- fessure in prossimità delle imposte e normali a queste: compaiono presto e non hanno tendenza ad evolvere
- fessure con andamento casuale
- fessure in zone molto iperstatiche o in corrispondenza del confine tra zone di marcata differenza di deformabilità
- fessure ubicate in corrispondenza della separazione tra zone di differente inerzia e marcata differenza di deformabilità
- fessure delimitanti zone dotate di armature.

Spesso l'apertura delle fessure presenta andamento che tende a stabilizzarsi raggiungendo nel tempo una posizione di relativo bilanciamento, senza però che si possa escludere un ulteriore progresso.

In caso di sviluppo della fessurazione, il rischio da temere è quello di ritrovarsi con una porzione della diga separata dal resto, e in condizioni tali che la sua stabilità non è assicurata, ciò dipende dalle caratteristiche geometriche delle fessure; importante è quindi un'esatta individuazione delle fessure.

Quando le fessure sono passanti, danno luogo a filtrazioni con possibile attacco di acque aggressive.

D) DIGHE A VOLTE MULTIPLE

L'andamento delle isostatiche di compressione a carico idrostatico massimo (per il quale è stato dimensionato) procede entro il contrafforte da monte verso la fondazione secondo linee arcuate. Le tensioni normali a tali isostatiche sono minime, e possono risultare di trazione specie nella zona bassa del contrafforte.

A massimo livello d'invaso, una rilevante spinta idrostatica si concentra sul contrafforte che è sottile; per livelli minori, cambiano entità e direzione della forza risultante agente sullo sperone, e con-

seguenti sollecitazioni. Si verifica un flusso di tensioni periodicamente variabili entro una struttura sottile.

Per superamento della resistenza a trazione, si formano nel tempo fessure alla base dei contrafforti; esse sono in genere inclinate verso monte; quando il materiale è indebolito da altri deterioramenti vi è la possibilità che le fessure si estendano col tempo verso l'alto e che possano compromettere la situazione statica del contrafforte.

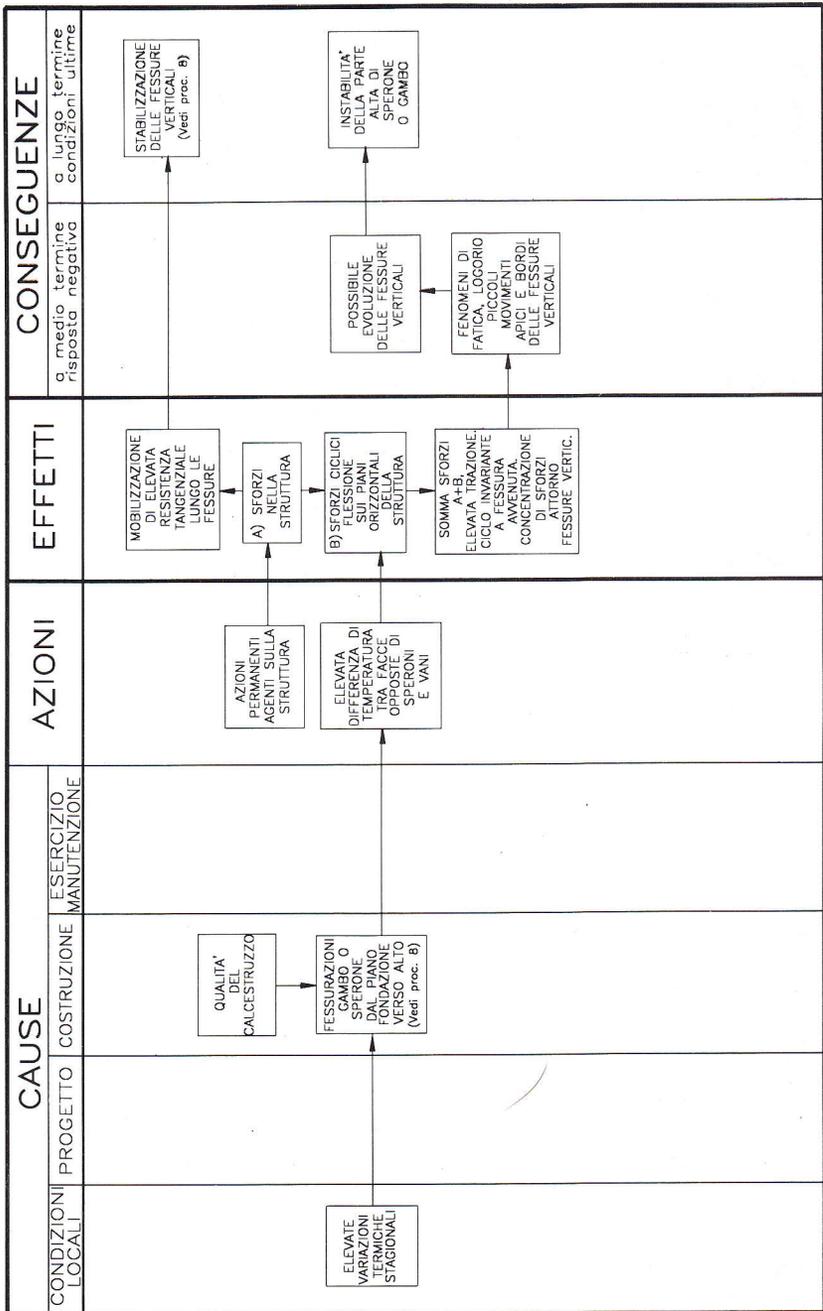
Zone staticamente pericolose possono risultare quelle di raccordo tra espansione a monte e gambo del contrafforte.

Assestamenti e particolari comportamenti della roccia di fondazione possono incrementare il fenomeno di fessurazione.

DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETREME E MALTA

DIGHE A SPERONI ED A VANI INTERNI - CORPO DIGA

PERDITA DI RESISTENZA CAUSATA DA
AZIONI PERMANENTI O RIPETUTE
PROCESSO 11-B

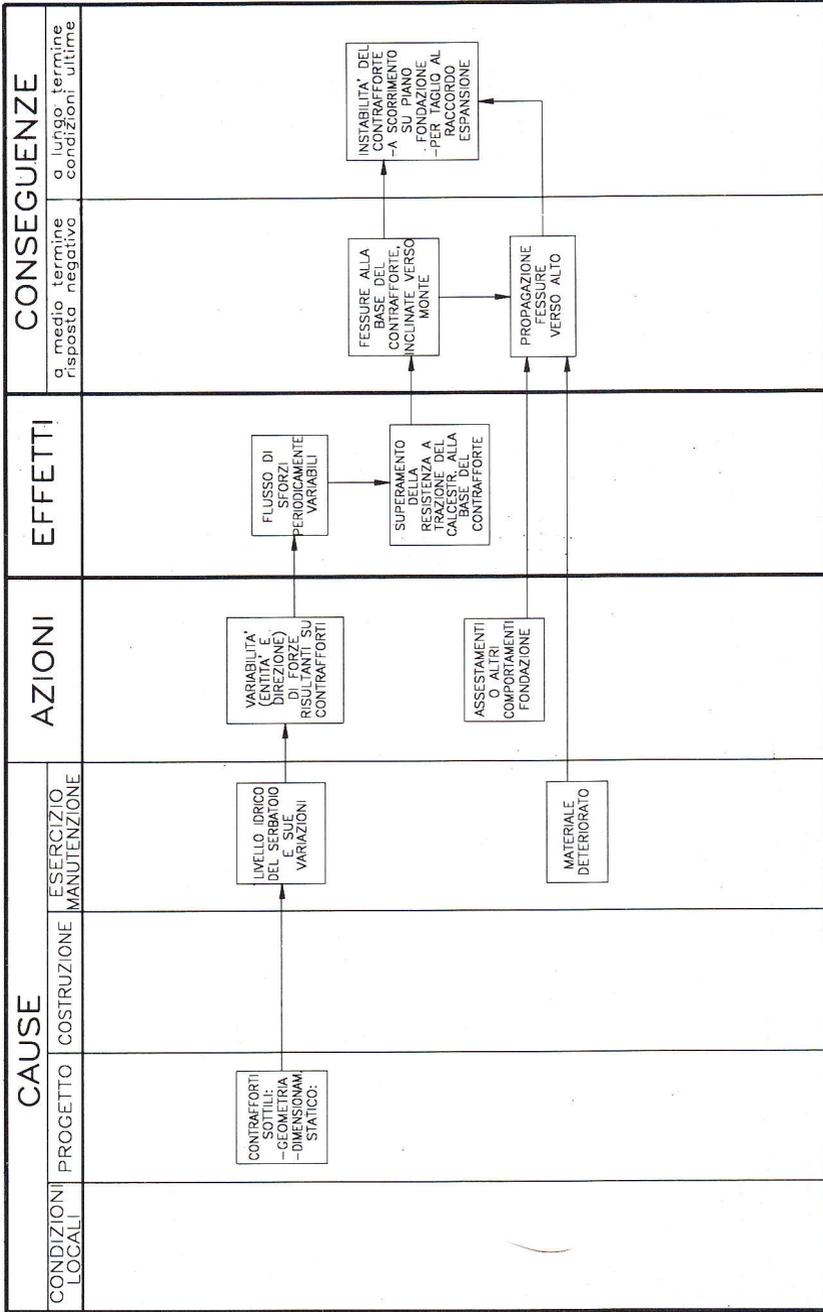


DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETREME E MALTA

DIGHE A VOLTE MULTIPLE - CORPO DIGA

PERDITA DI RESISTENZA CAUSATA
DA AZIONI PERMANENTI O RIPETUTE

PROCESSO 11-D



12 AZIONE DEL GELO

I cicli naturali di gelo-disgelo producono deterioramento o meno se si presentano opportune combinazioni di fattori interni ed esterni, che sono:

- le proprietà di calcestruzzo e malta:
 - * porosità, sia della pasta di cemento, che dell'aggregato; è il principale fattore
 - * permeabilità
 - * resistenza meccanica
 - * variabilità del modulo elastico nel tempo
 - * caratteristiche termiche
 - * qualità dell'aggregato
 - * modalità di posa in opera
- le condizioni ambientali cui la struttura è esposta:
 - * posizione geografica e altitudine della località
 - * temperature minima-massima raggiunte durante il ciclo; durata del ciclo; gradiente di raffreddamento
 - * contenuto di umidità del calcestruzzo al momento della formazione del ghiaccio
 - * azione erosiva del campo di ghiaccio

È determinante la struttura, tipo, dimensione e distribuzione dei pori. Il congelamento dell'acqua avviene soprattutto nei pori capillari a temperatura molto basse, che dipendono dalla dimensione dei pori.

Il calcestruzzo è più soggetto ai danni del gelo quando la sua umidità è elevata e raggiunge la saturazione; il passaggio da acqua a ghiaccio comporta aumento di volume; ciò causa dilatazione del materiale oltre il suo limite elastico, sovente fessurazione superficiale fino a completa disintegrazione della porzione di calcestruzzo interessata dal fenomeno.

Sul paramento di monte, il deterioramento è in genere limitato alla zona di oscillazione del livello d'invaso; può verificarsi anche nella parte alta, per cattiva qualità dell'aggregato. Su paramenti in pietrame-malta si verifica allentamento e distacco di pietre. Sensibili al deterioramento sono spigoli, i giunti di contrazione e le ripre-

se di getto. Nella parte bassa di paramenti di valle soggetti a travellazione importante, il calcestruzzo può essere in permanenza totalmente saturo, e vi si può verificare distacco di placche e squame.

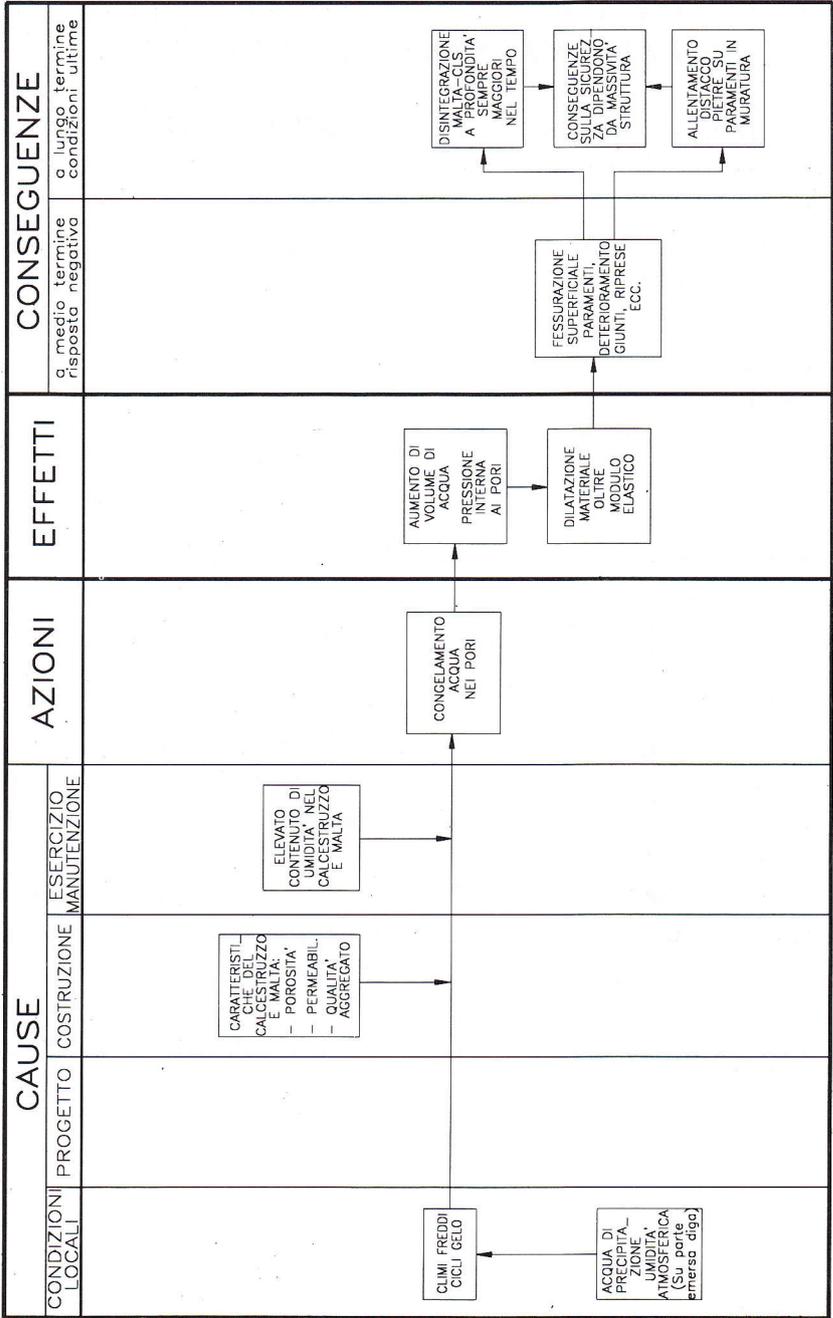
Le conseguenze dell'azione del gelo sulla sicurezza dipendono dalla massività della struttura.

DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETREME E MALTA

CORPO DIGA

PROCESSO 12

AZIONE DEL GELO



13 DEGRADO DEL SISTEMA DI TENUTA DEI GIUNTI STRUTTURALI

Il degrado preminente sui giunti verticali di costruzione e sui giunti perimetrali di dighe ed arco coincide con il deterioramento del sistema di tenuta.

Il sistema di tenuta è genericamente costituito da un elemento nastriforme di tenuta (waterstop) di norma annegato nel calcestruzzo a cavallo del giunto ed a conveniente distanza dal paramento di monte, e da un eventuale travetto copri-giunto in calcestruzzo, disposto a filo del paramento e poggiante su feltri.

La porzione di calcestruzzo compresa tra waterstop e paramento di monte ha comportamento strutturale di mensola.

La mensola ed il travetto, già realizzati in condizioni di getto difficoltoso, sono soggetti ad azioni esterne (elevate variazioni di temperatura e umidità, gelo e disgelo, lastra di ghiaccio nel serbatoio) che determinano il loro deterioramento. Ne segue la perdita di efficienza dei materiali di appoggio e sigillanti ed anche l'allentamento del waterstop.

I due spigoli a monte dei conci adiacenti al giunto possono contrastare uno con l'altro in fase di chiusura del giunto o per differenti comportamenti anche di fondazione dei due conci, fino a fessurazione delle corrispondenti mensole.

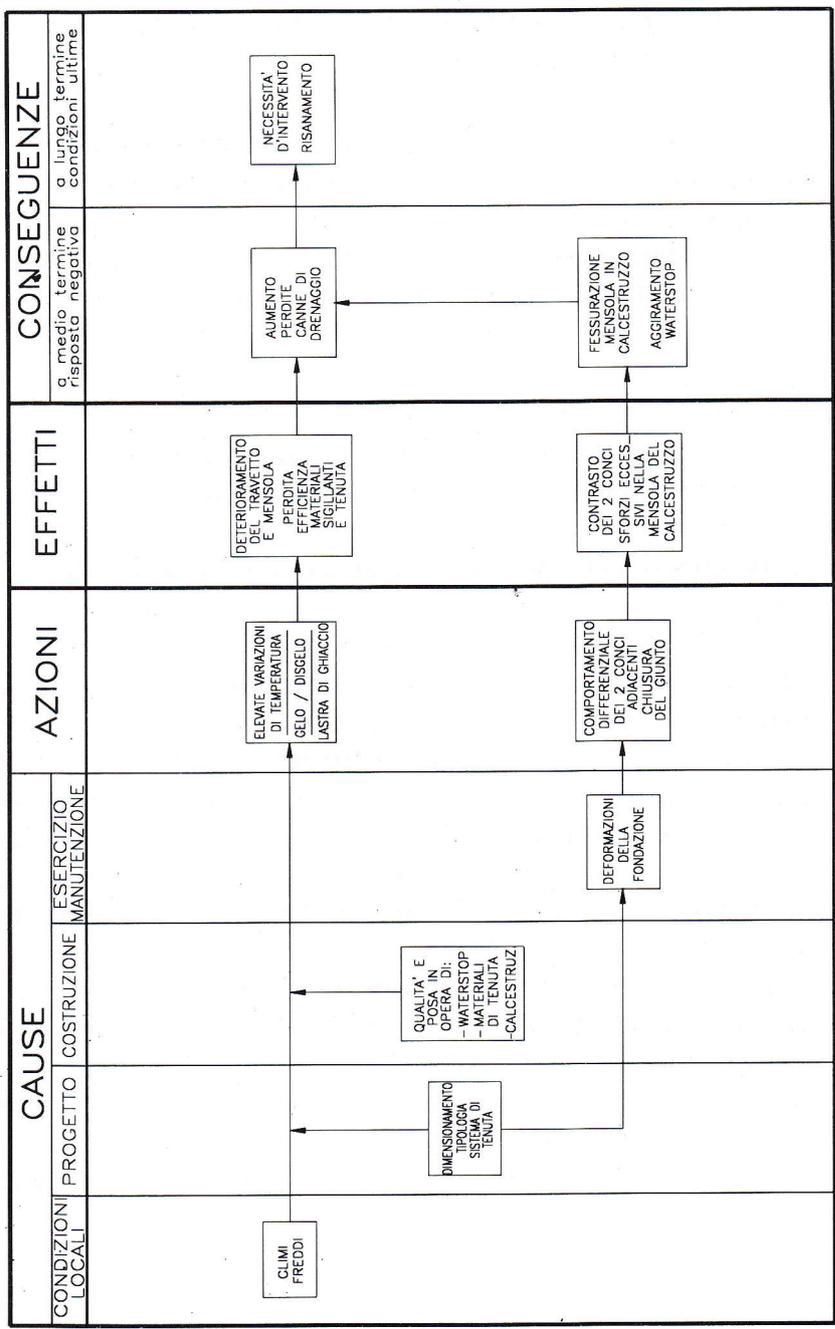
In ambedue i casi si verifica un afflusso d'acqua del serbatoio verso l'interno del giunto ed un aumento di percolazione nelle canne di drenaggio. Sono quindi determinanti una corretta progettazione e scelta dei materiali, e soprattutto una precisa posa di questi ed un getto molto accurato delle corrispondenti parti in calcestruzzo.

DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETREME E MALTA

CORPO DIGA

PROCESSO 13

DEGRADO DEL SISTEMA DI TENUTA DEI GIUNTI STRUTTURALI



14 DEGRADO DEI RIVESTIMENTI DI MONTE

Sono illustrati i principali tipi di rivestimento impiegati per assolvere la funzione di tenuta sulla diga prima che, attorno al 1950, si generalizzasse il paramento di monte in calcestruzzo di getto; inoltre il rivestimento in geomembrana sintetica flessibile che attualmente trova largo in particolare impiego per interventi di ripristino della tenuta.

A) RIVESTIMENTO IN GUNITE ARMATA

Il rivestimento è costituito da uno strato di malta proiettata a pressione, di spessore fino a circa 10 cm, provvisto di armatura metallica ed ancorato al corpo diga.

Deterioramenti tipici sono: fessurazione diffusa; distacco di placche.

La fessurazione è conseguente a sforzi di trazione nella malta determinati a causa del vincolo di solidarietà con il corpo diga che impedisce la sua libera deformazione di ritiro ed a seguito di variazioni termiche rapide. Attraverso le fessure, l'acqua di serbatoio porta la sua azione negativa contro il corpo diga ed il rivestimento stesso.

Il distacco di placche trova innesco in difetti di costruzione, mancata pulizia della faccia di applicazione, distorsioni dell'armatura metallica, vespai nello spessore che consentono percolazione di acqua.

Abbassandosi il livello del serbatoio, a tergo del rivestimento in gunite si può sviluppare una contro-pressione che determina il distacco. La zona di paramento più danneggiata è in effetti quella di oscillazione del livello di invaso, ove si aggiunge l'azione abrasiva della eventuale lastra di ghiaccio.

In climi freddi il deterioramento porta il rivestimento in gunite a rovina in un periodo di 10-20 anni.

B) RIVESTIMENTO IN BOLOGNINI SQUADRATI A GIUNTI STILATI

È costituito da un manto di masselli, in pietra di elevate caratteristiche meccaniche, di spessore 40-60 cm, legati tra loro da giunti in malta cementizia, formanti campi corrispondenti ai conci della diga. Si ritrova solo su dighe costruite prima del 1960.

Nel caso delle dighe in pietrame e malta, il rivestimento è spesso collegato al corpo diga mediante uno strato di transizione perché in genere realizzato successivamente a quello; è invece ammorsato nel caso delle dighe in calcestruzzo in quanto eseguito contemporaneamente al getto.

Ove la solidarietà col corpo diga è limitata (corpo in pietrame e malta), nello spessore del rivestimento sono indotti sforzi che risultano gravosi per le sezioni di minor resistenza (i giunti), con conseguente fessurazione della malta; a ciò contribuiscono anche le rapide variazioni di temperatura ambiente. Tra campi di rivestimento relativi a conci adiacenti, si è riscontrato l'insorgere di forze di contrasto determinate dall'elemento a copertura del giunto diga, e conseguente allentamento e distacco di estese zone di rivestimento.

Su dighe in calcestruzzo, deterioramenti simili sono piuttosto dovuti alla differenza di caratteristiche elastiche e termiche esistenti tra malte e bolognini costituenti il rivestimento.

Questo rivestimento si è dimostrato molto efficace contro l'azione di rottura del gelo e quella abrasiva di lastre di ghiaccio.

La durata può valutarsi in almeno 40 anni su dighe in pietrame e malta ed ancor più su quelle in calcestruzzo.

C) RIVESTIMENTO IN GEOMEMBRANE SINTETICHE FLESSIBILI

Tranne che in un caso, risalente al 1969, l'esperienza italiana è riferita all'impiego di geomembrane a base di PVC.

Il rivestimento è costituito da una geomembrana in strato sottile (fino a 3 mm), ancorata al corpo diga in modo idoneo per mezzo di fissaggi meccanici (16 casi in Italia, secondo la medesima tecnologia applicativa e qualità del materiale, ed 8 all'estero, a partire dal 1970), od in modo continuo per mezzo di incollaggio su tutta la superficie (2 casi, nel 1969 e nel 1992). Nella maggior parte dei casi,

la geomembrana ingloba uno strato drenante a tergo. Nel caso di dighe in pietrame e malta, od in generale in presenza di paramenti con notevoli asperità, viene spesso installato uno strato di transizione, con funzioni di antipunzonamento e di aumento della capacità drenante.

Nel caso di manti totalmente solidali con il sottostante paramento, e quindi privi di una intercapedine drenante, l'azione delle differenze di temperatura a breve termine, in seguito alla formazione di ghiaccio e/o vapore, può portare ad un parziale distacco nel collegamento tra membrana e corpo diga, con parziale perdita di efficienza del manto impermeabilizzante e locale degrado del calcestruzzo del paramento di monte.

Sulla superficie della geomembrana a contatto con l'acqua dell'invaso, l'azione meccanica dovuta alla presenza di lastre di materiali di trasporto di grandi dimensioni (frane e valanghe) e/o alla presenza di lastre di ghiaccio in climi rigidi, può causare rotture locali peraltro facilmente riparabili, essendo la membrana a vista.

Per quanto riguarda l'azione dei raggi ultravioletti e dell'ozono, le condizioni dei manti attualmente in esercizio fanno ritenere che il degrado delle proprietà iniziali sia un'eventualità rientrante esclusivamente nelle conseguenze a lungo termine (oltre 30 anni).

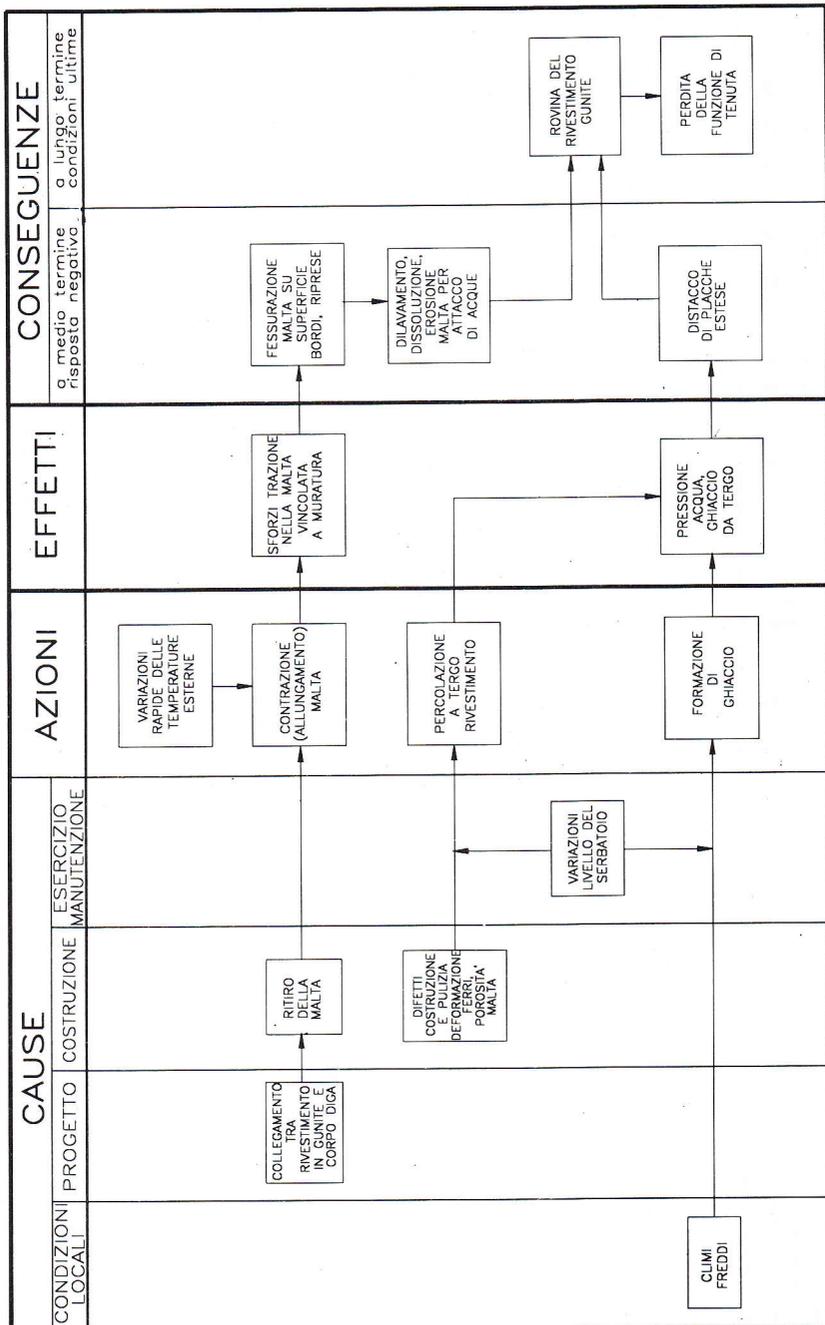
DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETRAMÈ E MALTA

CORPO DIGA

14-A

PROCESSO

DEGRADO DEI RIVESTIMENTI A MONTE
RIVESTIMENTO IN GUNITE ARMATA



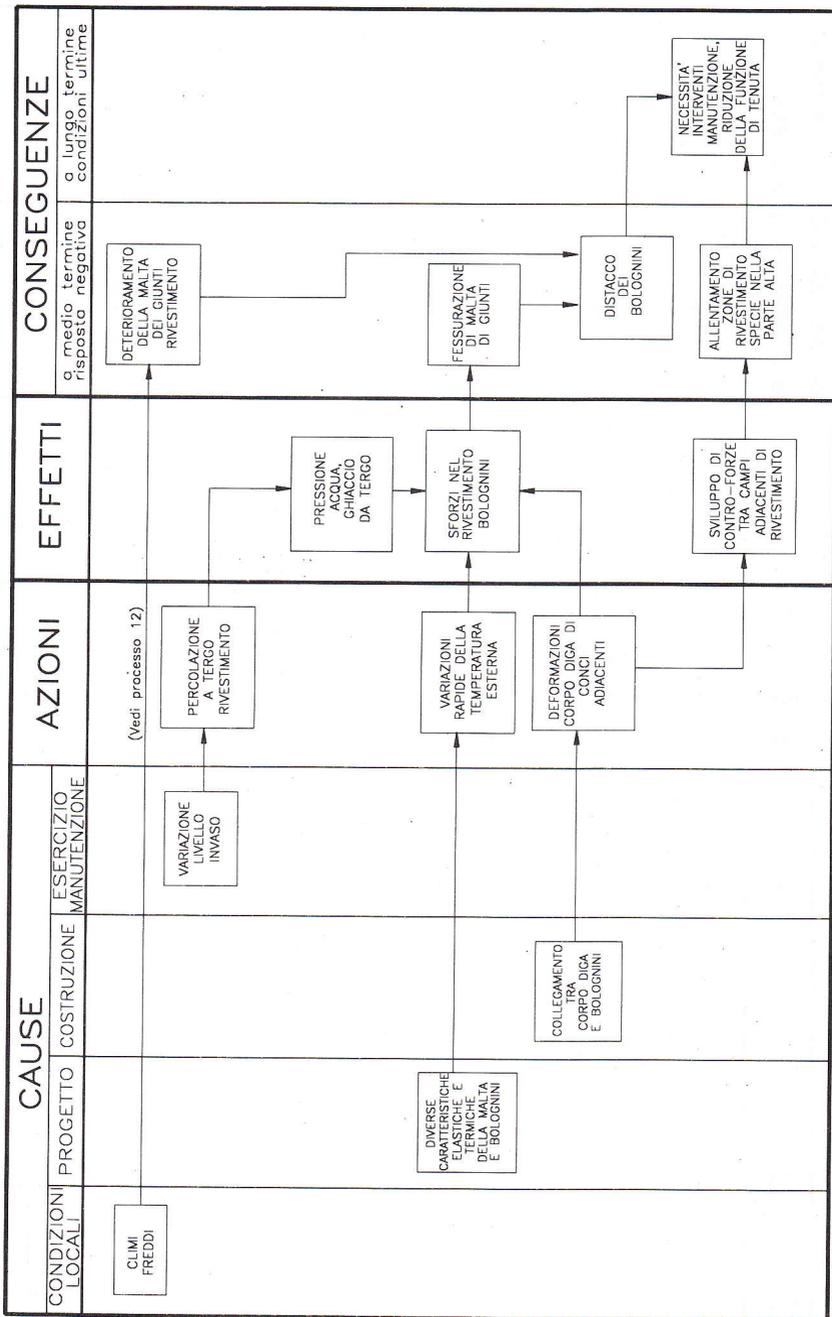
DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETREME E MALTA

CORPO DIGA

PROCESSO

14-B

DEGRADO DEI RIVESTIMENTI A MONTE
RIVESTIMENTO IN BOLOGNINI QUADRATI A GIUNTI SIGILLATI



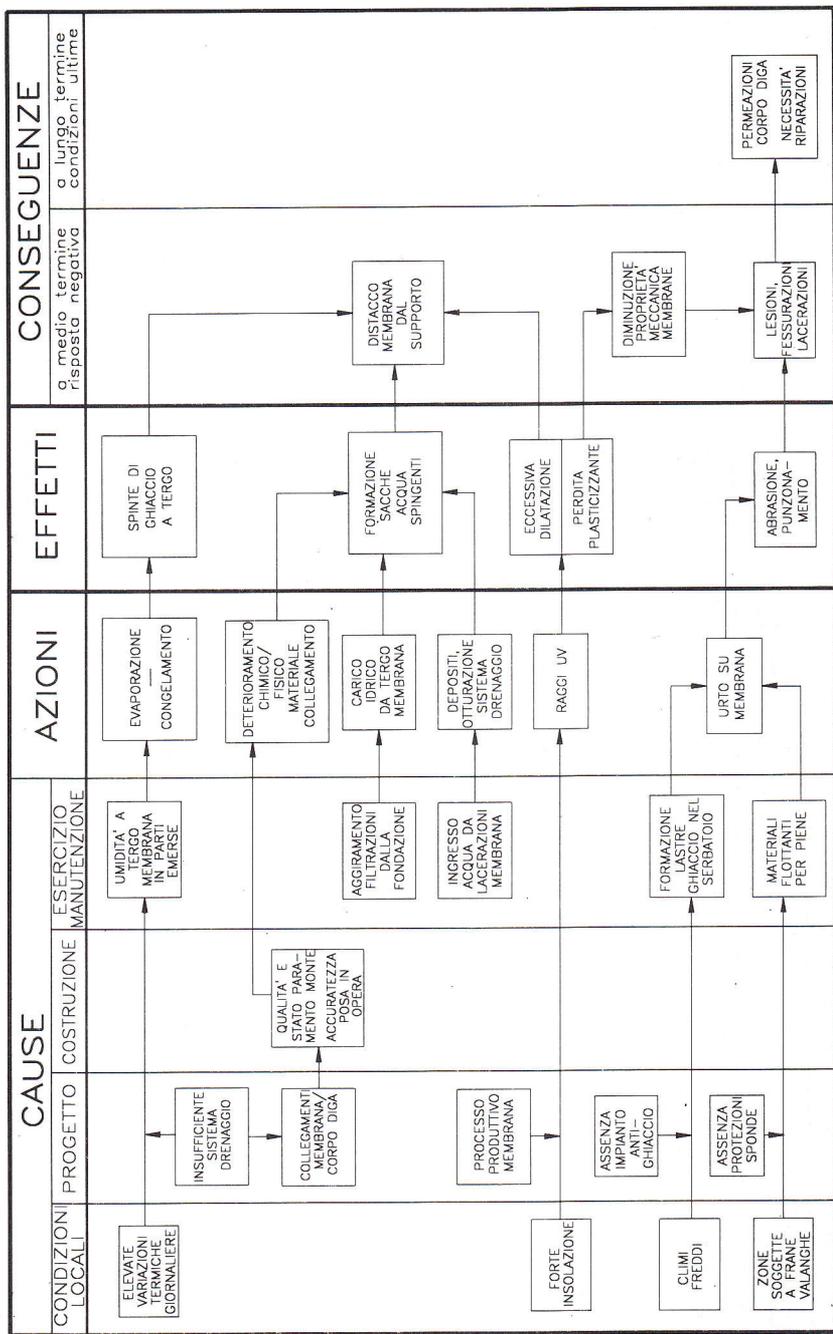
DIGHE IN CALCESTRUZZO ED IN PIETRAM E MALTA

CORPO DIGA

PROCESSO

14-C

DEGRADO DEI RIVESTIMENTI A MONTE
GEOMEMBRANE SINTETICHE



PARTE III
DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI

A) PROCESSI RELATIVI ALLA FONDAZIONE

15 PERDITA DI RESISTENZA, AUMENTO DI SOTTOPRESSIONE, VARIAZIONE DELLO STATO DI SFORZO

Sono fenomeni associati con la rottura meccanica del terreno di fondazione, specie per taglio, e possono manifestarsi contemporaneamente.

A • La perdita di resistenza si verifica generalmente in materiali coesivi, a seguito di saturazione ed eccessiva deformazione, in particolare in:

- * argille che subiscono riduzione di coesione se sature;
- * terreni argillosi deformati oltre la loro resistenza di picco; le conseguenti rotture in seno alla fondazione determinano l'instabilità del rilevato.

B • Aumento di sottopressione si verifica dove il flusso abituale di filtrazione trova una ostruzione o subisce un improvviso incremento, e nei terreni non coesivi dove può avvenire una migrazione di parti fini. In questo caso, per ostruzione dei dreni, si verifica un aumento di sottopressione sotto il piede di valle dell'opera.

Fondazioni caratterizzate da bruschi passaggi della natura e permeabilità del terreno, e da rocce degradate e fratturate, con giunti aperti o riempiti di materiale erodibile, sono soggette a tali processi.

Allentamenti e rotture di fondazione fino ad innesco di sifonamento e formazione di sacche cedevoli sotto il rilevato sono le conseguenze che portano a compromettere la stabilità dell'opera.

C • Più rari sono i casi di variazione dello stato di sforzo; tra questi vale citare:

- * consolidazione di un rilevato omogeneo o di un nucleo in argilla, ubicati in una valle stretta e soggetti ad un effetto

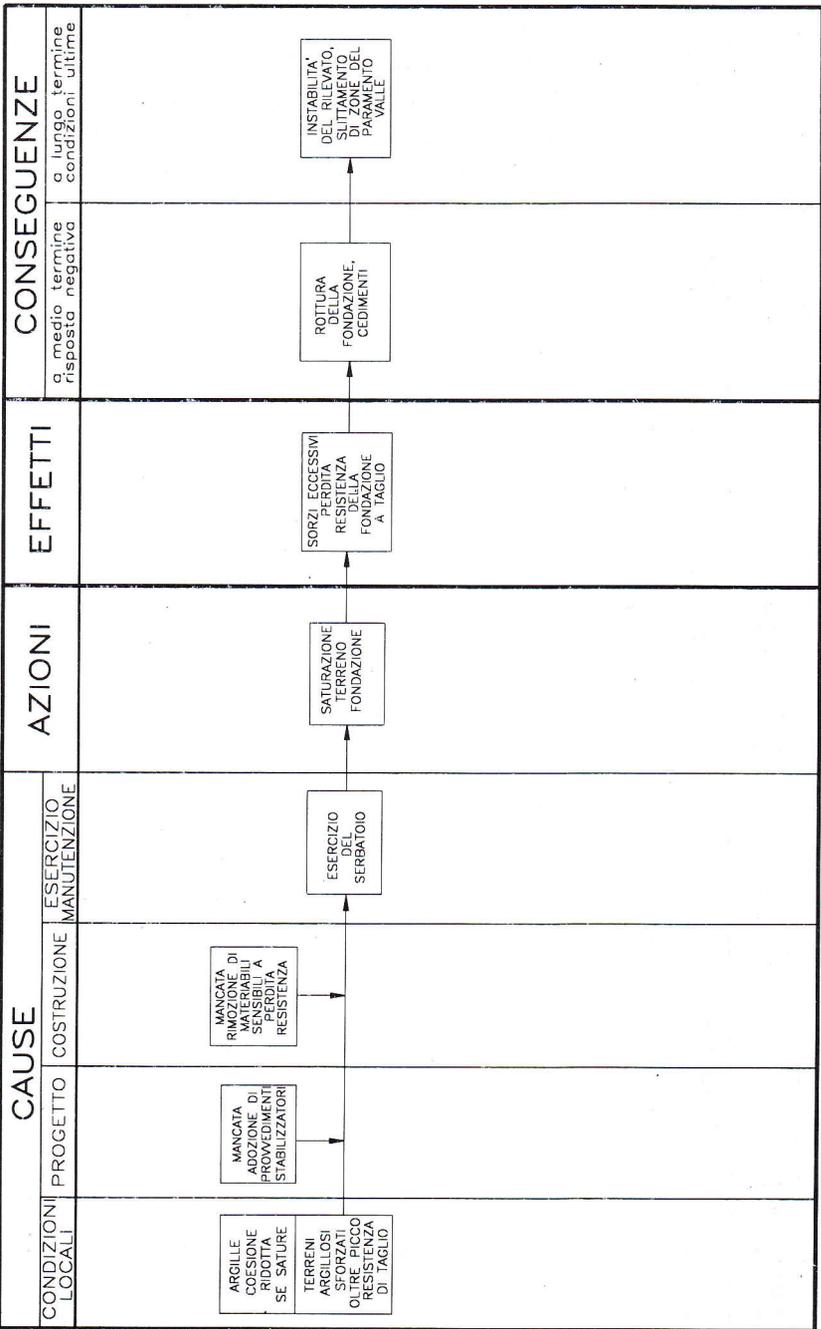
arco, con progressivo trasferimento del carico contro le sponde e riduzione degli sforzi verticali; a causa di questi fenomeni possono allora aprirsi pericolose vie di filtrazione; * sforzi alternati di taglio ed apertura dei giunti nei terreni rocciosi sul fondo del serbatoio, a seguito delle variazioni del livello di invaso.

DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI

FONDAZIONE

PERDITA DI RESISTENZA

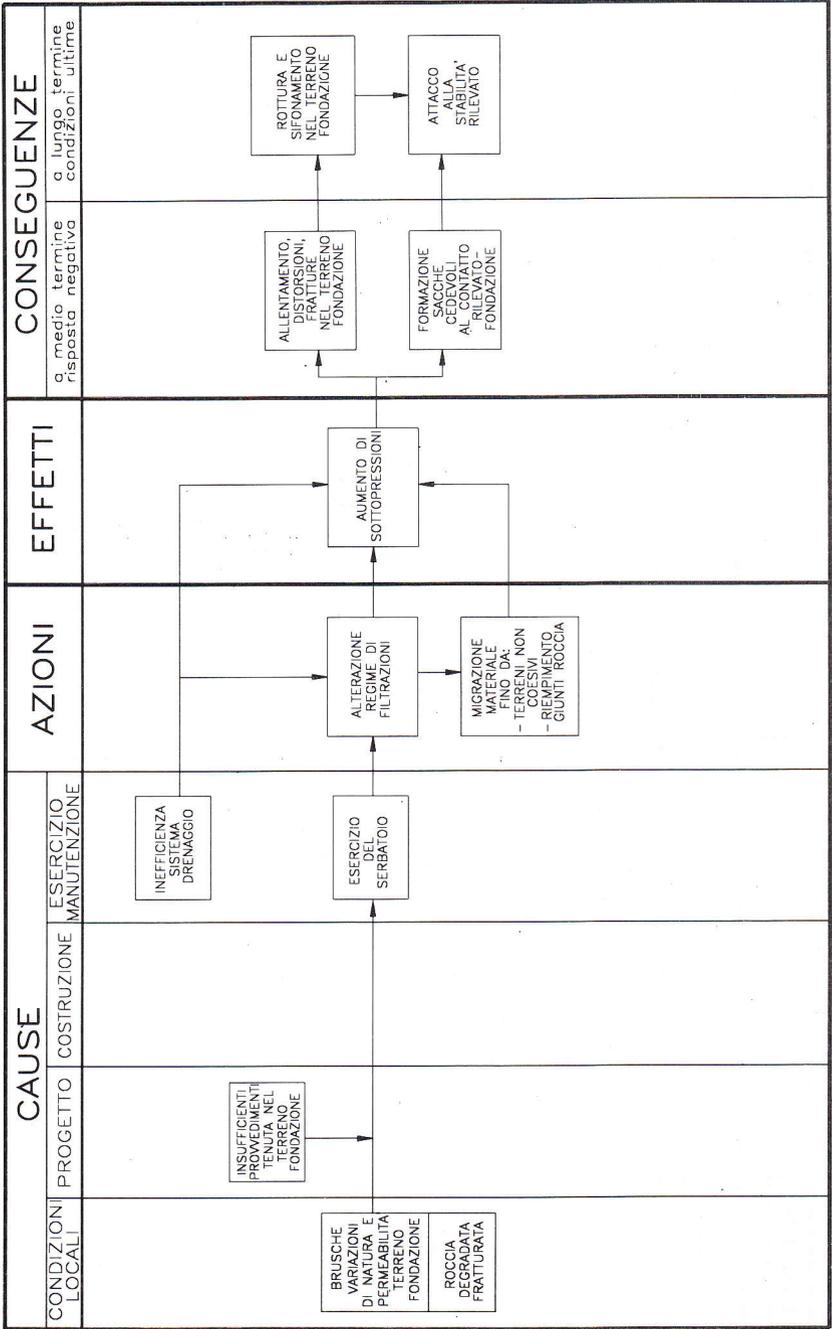
PROCESSO 15-A



**DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI
FONDAZIONE**

PROCESSO 15-B

AUMENTO DI SOTTO-PRESSIONI

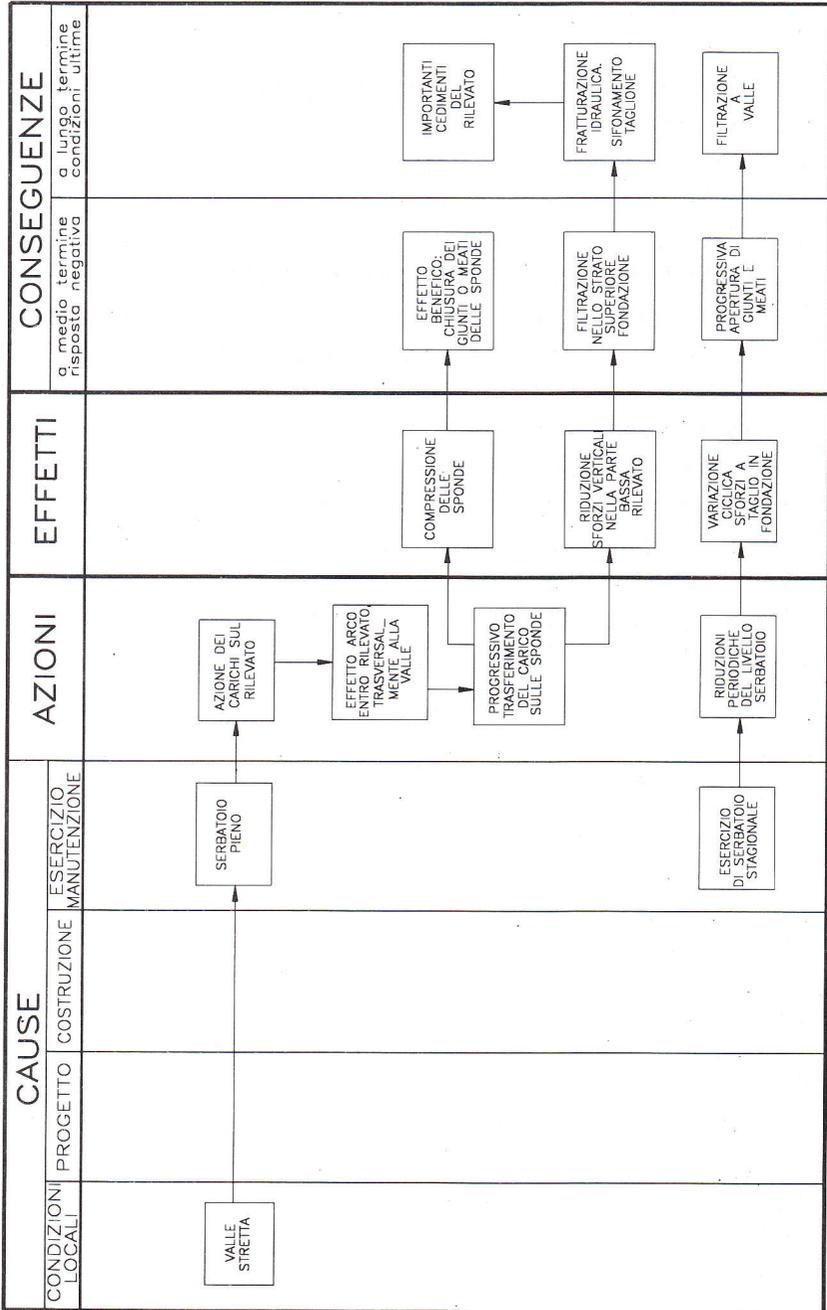


DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI

FONDAZIONE

VARIAZIONE DELLO STATO DI SFORZO

PROCESSO 15-C



16 DEGRADO DELLA FONDAZIONE

È l'alterazione delle caratteristiche e proprietà della fondazione, che portano a perdite di resistenza al taglio o ad incremento della permeabilità. Il veicolo primario di tali processi è la filtrazione.

L'alterazione consegue a processi chimici di dissoluzione o fisici di deterioramento, che possono verificarsi già al primo riempimento del serbatoio o progressivamente nel tempo in terreni ad essi sensibili. I primi riguardano certi minerali solubili unitamente alle caratteristiche chimiche dell'acqua di filtrazione; i secondi riguardano, le argille dispersive per effetto di acqua pura, i terreni a bassa coesione quando saturi, i terreni non coesivi a grana discontinua.

Il moto di filtrazione promuove tali processi di dissoluzione e deterioramento dei materiali, i quali possono poi essere facilmente dilavati, incrementando il volume dei vuoti in fondazione; il fenomeno di erosione ne risulta accelerato.

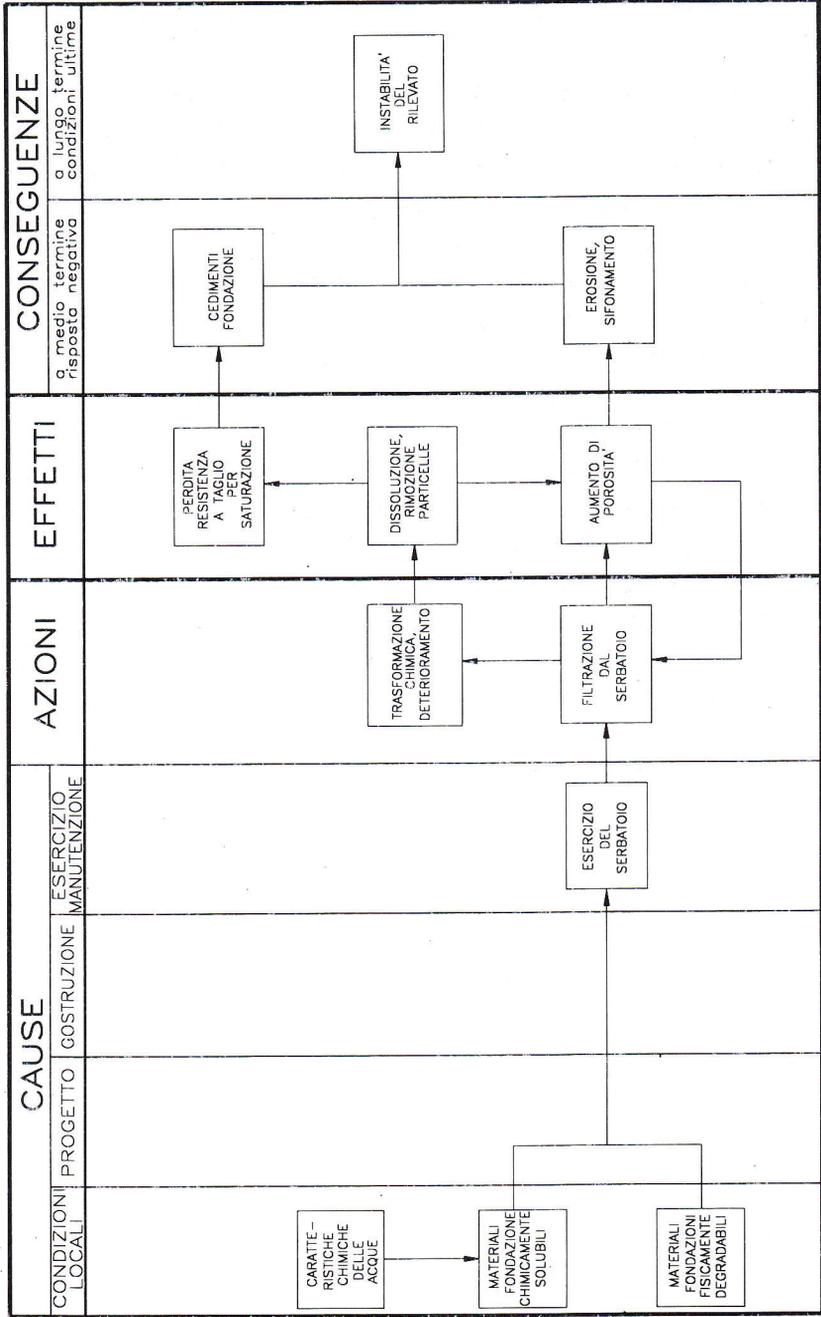
D'altra parte, la perdita di resistenza può portare a cedimenti per rotture interne alla fondazione.

DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI

FONDAZIONE

PROCESSO 16

DEGRADO DELLA FONDAZIONE



17 EROSIONE INTERNA

L'erosione interna è il processo di invecchiamento più comune nelle fondazioni di dighe in materiali sciolti. Esso può verificarsi anche molti anni dopo il primo riempimento del serbatoio, benché sia da mettere in relazione con inadeguatezza di progettazione e di procedimenti costruttivi.

A seguito della filtrazione, un vuoto può facilmente verificarsi nelle fondazioni in roccia, che siano caratterizzate da materiale di riempimento dei giunti tenero ed alterabile o da disturbi geologici, ovvero nel caso di terreno sciolto il cui assortimento granulare discontinuo comporti tendenza ad instabilità interna. In ambo i casi, operazioni sommarie di scavo, che abbiano lasciato uno strato soffice a contatto del rilevato (giunti dilavati, meati non costipati) facilitano l'insorgere del fenomeno.

L'acqua si propaga attraverso la rete di giunti o pozzi ed il flusso può aumentare perché nei casi sopraddetti la mobilitazione degli elementi fini è agevole; altri fattori possono contribuire, quali il degrado dei materiali (ved. processo 16), l'invecchiamento dello schermo e simili.

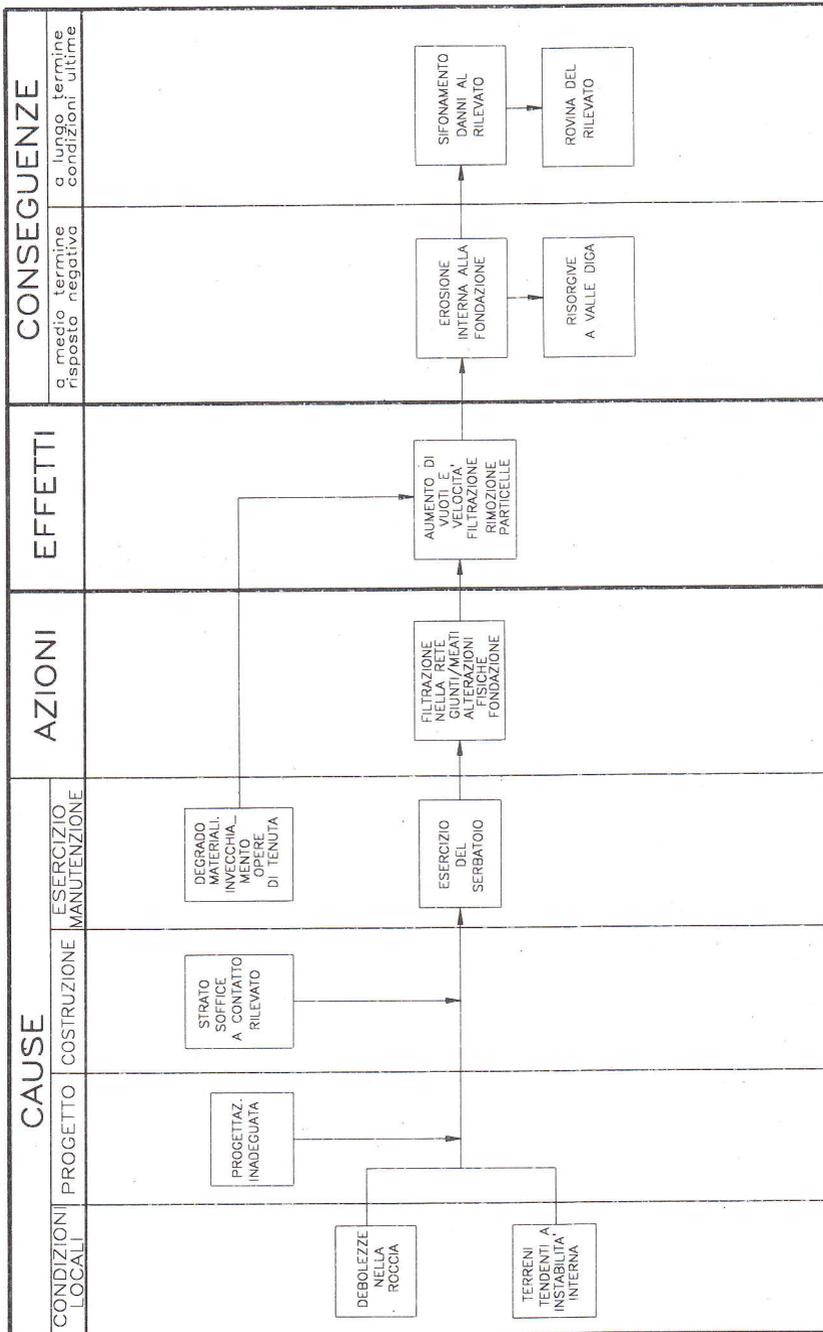
La velocità di filtrazione può raggiungere valore tale da determinare trascinarsi di particelle ed innescare un sifonamento che può comportare pericolose conseguenze sul rilevato.

DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI

FONDAZIONE

PROCESSO 17

EROSIONE INTERNA



B) PROCESSI RELATIVI AL RILEVATO

18 DEFORMAZIONE DEL RILEVATO

Le principali cause della deformazione del rilevato sono il processo di consolidazione ed il riempimento del serbatoio.

La consolidazione è il processo di assestamento verticale continuo del rilevato a seguito del peso del materiale impiegato; dipende dalla natura e dimensioni di quest'ultimo e dalle caratteristiche della posa in opera (densità, umidità); la consolidazione è influenzata da azioni ambientali (sisma, precipitazioni) ed anche operative (variazioni di livello del serbatoio, traffico sul coronamento).

La spinta idrica comporta una deformazione soprattutto orizzontale in direzione valle.

La ripidezza delle sponde è responsabile di spostamenti longitudinali nel rilevato.

Il processo di deformazione complessivo dura molti anni; esso può portare ad alcune conseguenze negative:

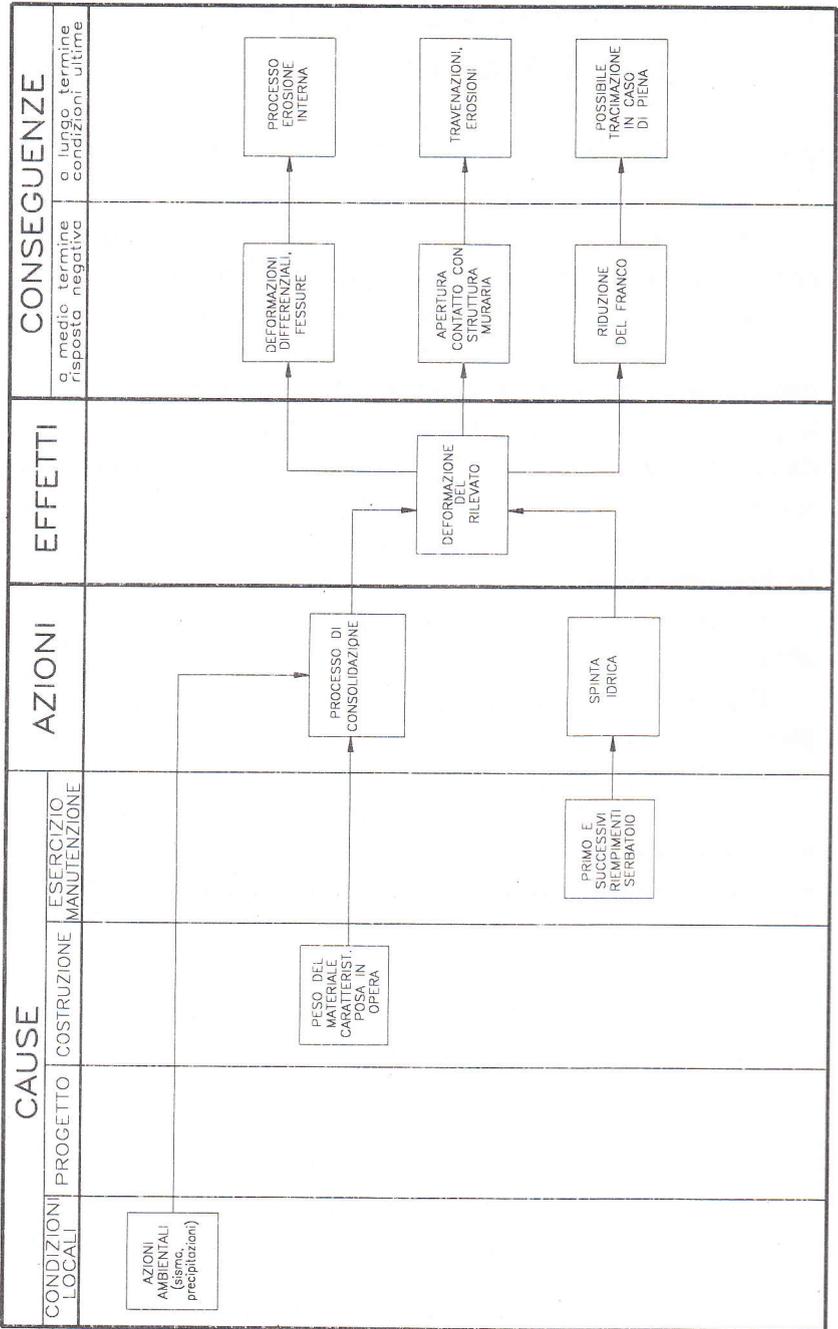
- deformazioni differenziali, con formazione di fessure nel corpo del rilevato;
- apertura del contatto con strutture murarie adiacenti;
- riduzione del franco, con pericolo di possibile tracimazione in caso di piena.

DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI

RILEVATO

PROCESSO 18

DEFORMAZIONE DEL RILEVATO



19 PERDITA DI RESISTENZA

La perdita di resistenza è uno scenario importante, genera abitualmente deformazioni ed instabilità dei paramenti, specie quello di valle. Essa è dovuta ai seguenti processi:

- 1) La saturazione del rilevato imperfettamente compattato porta a perdite di coesione e di resistenza a taglio. A seguito di una forza di compattazione insufficiente a ridurre il volume dei vuoti, anche in situazioni di saturazione incompleta (ristagni) è possibile un ampio riorientamento delle particelle del materiale.

Se la sottocompattazione riguarda una grande parte del rilevato, si hanno grandi assestamenti di questo, in genere al primo riempimento del serbatoio o subito dopo; se riguarda porzioni occasionali, si hanno assestamenti differenziali e di conseguenza possibile fessurazione, travenazioni e zone ad elevata pressione interstiziale.

Tali problemi possono richiedere parecchi anni prima di diventare visibili.

- 2) Terreni aventi elevata resistenza al taglio e coesione se asciutti, ma soggetti a forte perdita di coesione se bagnati.

L'instabilità a valle è funzione della filtrazione nel rilevato, della filtrazione dalle sponde verso il materiale di valle, dell'intensità e durata delle precipitazioni.

Richiede tempo per manifestarsi.

- 3) Cambiamento dello stato di sforzo.

Una perdita di resistenza può manifestarsi in rilevati costruiti con materiali di bassa resistenza o secondo metodi di costruzione (es. procedimento idraulico) che impediscono al materiale di sviluppare la sua piena resistenza.

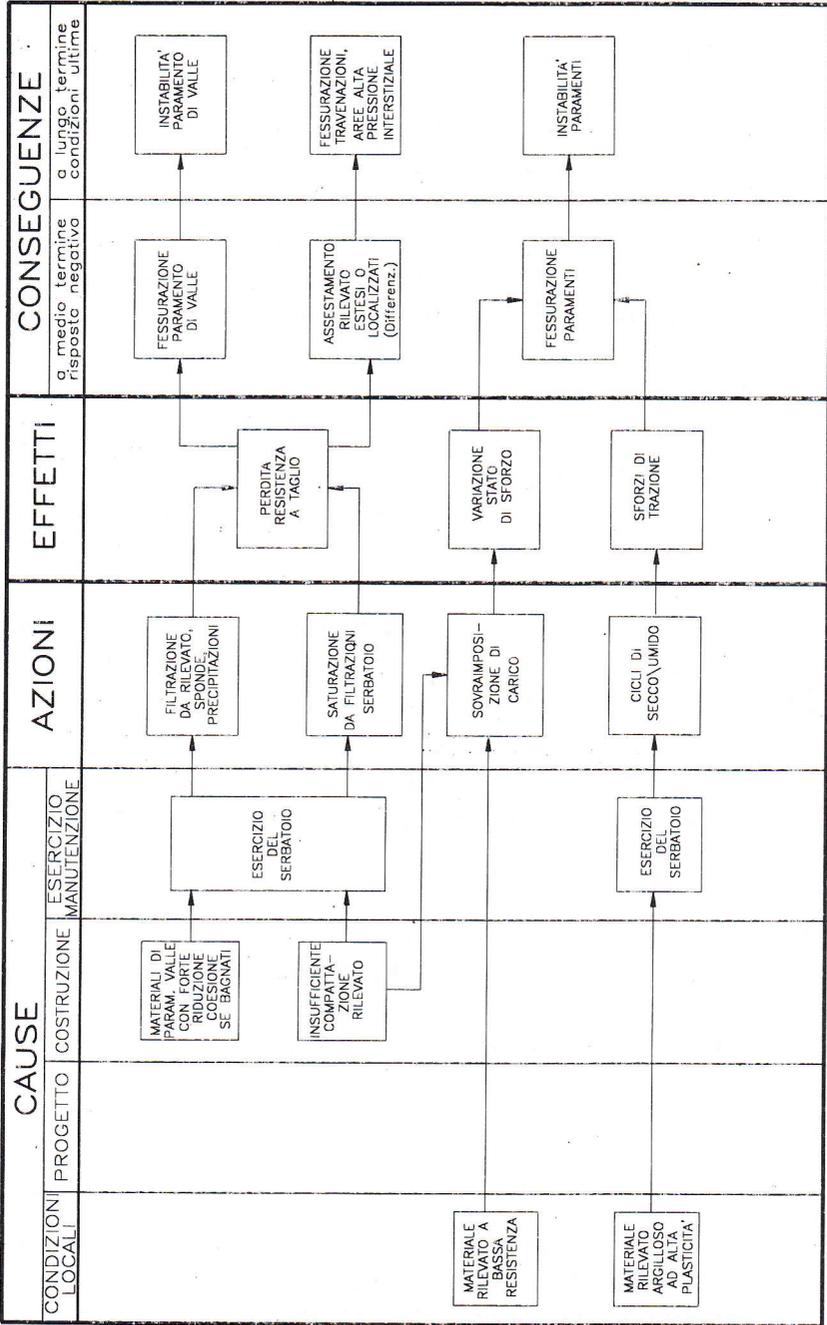
Cicli di secco/umido hanno influenza su materiale argilloso molto plastico. Col disseccamento si formano fessure per trazione; il ripresentarsi dell'acqua determina rigonfiamento e distacco di particelle dalle pareti delle fessure. Conseguenza instabilità delle facce inclinate, su modeste profondità, ma col pericolo di ridurre nel tempo la larghezza efficiente del rilevato.

DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI

RILEVATO

PROCESSO 19

PERDITA DI RESISTENZA



20 AUMENTO DI PRESSIONE INTERSTIZIALE

L'aumento su tempi lunghi della pressione interstiziale è legato alla progressiva apertura di fessure trasversali (direzione monte-valle) entro il nucleo o nell'intero rilevato.

Le fessure possono avere varia origine:

- assestamenti differenziali di fondazione o al contatto con strutture murarie, per trasferimento di sforzi (archings, deformazione del rilevato, zone di trazione al coronamento), nucleo argilloso sottile;
- degrado del materiale, quale dissoluzione di argille dispersive, zone deboli del nucleo, posa in opera difettosa;
- dipendenti dal livello idrico nel serbatoio: fratturazione idraulica, essiccamento della parte superiore del nucleo, zona di valle non autodrenante.

Le fessure offrono una via alla filtrazione, che si propaga verso valle, a meno che sia intercettata da filtro o dreno.

Nella zona di valle si ha incremento di pressione interstiziale, con dannose conseguenze sulla stabilità di tale parte del rilevato.

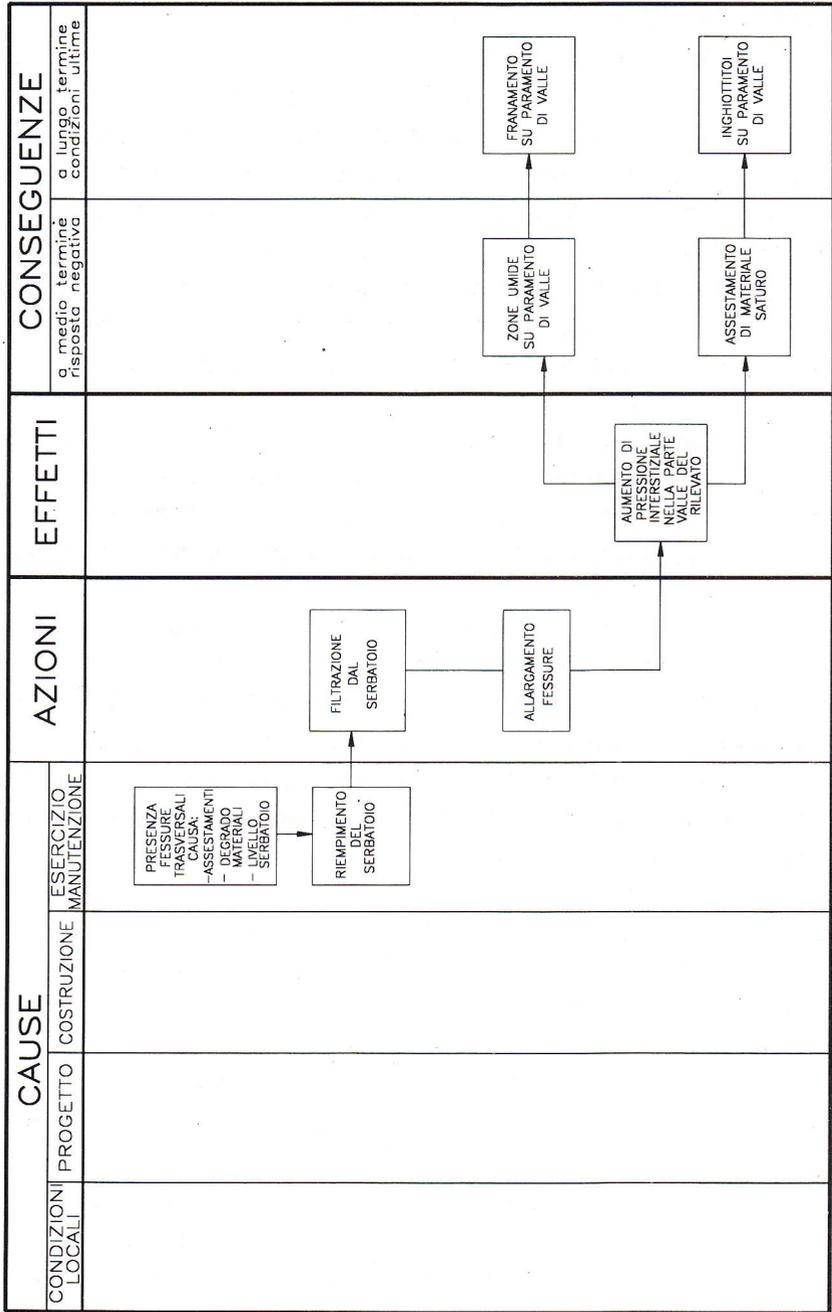
Si manifestano zone bagnate e franamenti sul paramento valle, assestamento di porzioni di materiale saturo, formazione di inghiottitoi.

DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI

RILEVATO

PROCESSO 20

AUMENTO DI PRESSIONE INTERSTIZIALE



21 EROSIONE INTERNA

In genere è un processo che si sviluppa lentamente nel tempo e può rimanere a lungo inosservato poiché ha carattere regressivo, sviluppandosi da valle verso monte. Si manifesta soprattutto nel nucleo, al contatto nucleo-fondazione, nella porzione di valle del rilevato.

Ha origine per insufficienze di progetto e di costruzione e si verifica in rilevati suscettibili di fessurazione, sifonamento, erosione.

Le cause dirette possono essere svariate:

- al contatto rilevato-fondazione: roccia fessurata o solubile, suscettibile di erosione;
- nel nucleo: fessurazione, elevato gradiente di filtrazione, danni su parete monte (svaso rapido), argille dispersive;
- in corpo omogeneo: instabilità interna (terreni morenici);
- degrado e dissoluzione del materiale.

Influiscono anche i cedimenti della fondazione.

Il processo si sviluppa come segue:

- la fessura offre una via di passaggio e la filtrazione si propaga e trova sbocco a valle; aumentando la velocità, alcune particelle sono rimosse, la filtrazione diviene torbida. Avvengono assestamenti, possono aversi rotture locali con formazione di inghiottitoi ed innesco di sifonamento.
- In rilevato internamente instabile ed a granulometria discontinua, una filtrazione innescata da piani di debolezza determina migrazione del fino e causa rottura della matrice grossolana, a meno che il fino sia trattenuto da idoneo filtro.
- In argilla dispersiva, dove si sia innescata una perdita ed il gradiente elevato impedisca che la via possa ostruirsi, si verifica rottura (inghiottitoio) quando una sufficiente quantità di materiale è stata rimossa.

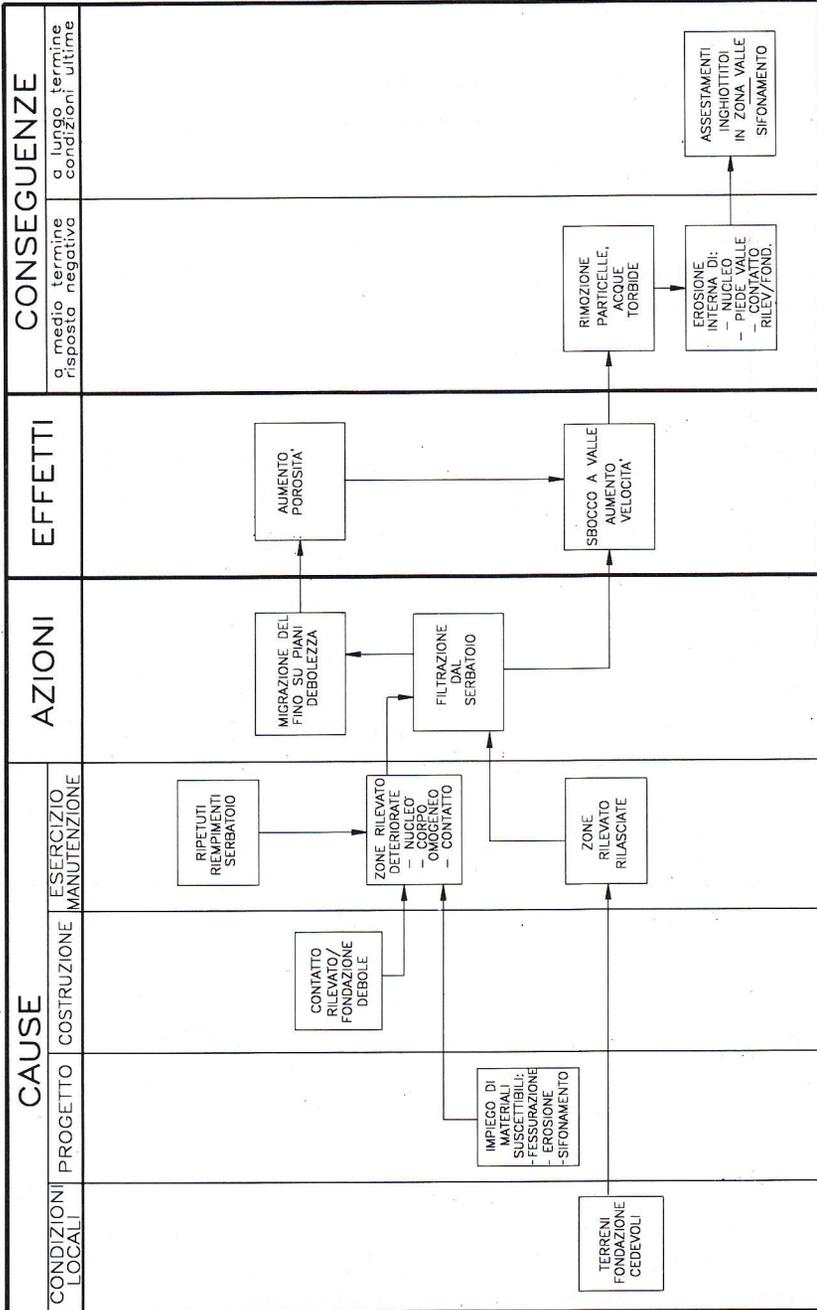
La filtrazione, che determina erosione nel rilevato, può anche provenire dalla zona di monte della fondazione quando sia costretta ad emergere entro il rilevato dall'ostacolo costituito dal sistema di tenuta e sia ovviamente di entità adeguata.

DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI

RILEVATO

PROCESSO 21

EROSIONE INTERNA



22 *DEGRADO DEL RILEVATO*

È l'alterazione delle caratteristiche e proprietà dei materiali del rilevato, che porta a perdite di resistenza al taglio e ad incremento delle permeabilità.

La filtrazione attraverso il rilevato è l'agente primario dell'alterazione, che si sviluppa in materiali degradabili (sensibili a dispersione, soluzione, rigonfiamento, processi termici e chimici) essenzialmente nei seguenti modi:

- rimozione di materiale erodibile o solubile;
- perdite di resistenza per saturazione, soprattutto in argille dispersive.

I detti processi sono riscontrabili su vecchi rilevati; i rilevati attuali sono assai meno soggetti, poiché sono compattati con mezzi pesanti e fruiscono quindi di bassa permeabilità e resistenza al taglio adeguata.

Inoltre, materiali che a contatto di aria ed intemperie ed in condizioni non confinate subiscono disgregazione, quali gli scisti argillosi, danno luogo a crollo degli elementi più sminuzzati entro i vuoti interni, causa il carico della porzione di rilevato sovrastante. Risulta aumento della permeabilità, riduzione della resistenza e deformazioni superficiali del rilevato.

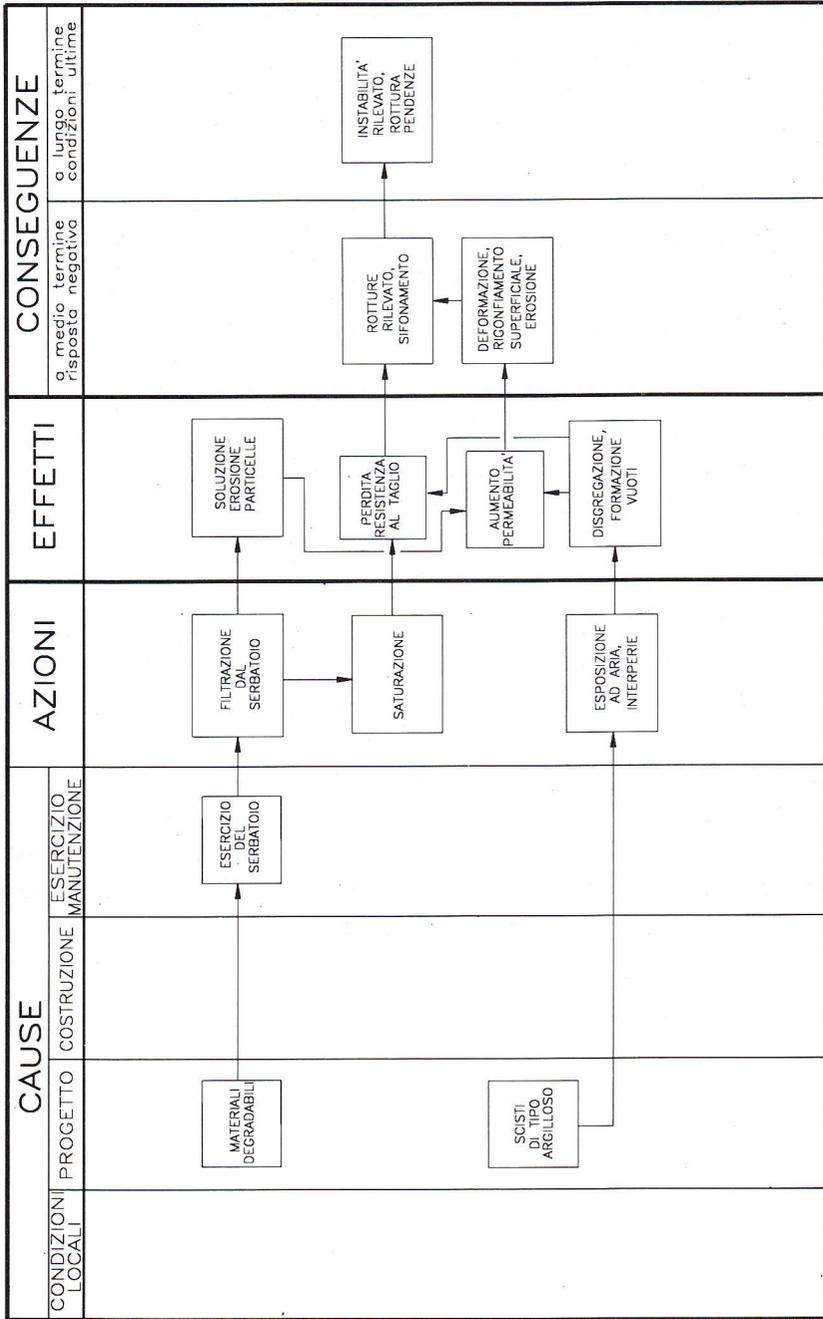
Il contatto diretto di nucleo e filtro di una diga con la fondazione di materiale degradabile favorisce il verificarsi di tali fenomeni in quanto sede potenziale di sifonamento.

DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI

RILEVATO

PROCESSO 22

DEGRADO DEL RILEVATO



23 PERDITA DI COLLEGAMENTO TRA RILEVATO E STRUTTURE MURARIE

Spostamenti nelle zone di contatto tra rilevato e strutture murarie (parte di sbarramento in calcestruzzo, opera dello scarico di superficie, cunicoli di ispezione al piede monte o sotto nucleo) sono in genere dovuti ad assestamenti del materiale del rilevato (specie per erosione interna, insufficiente compattazione) ed a cedimenti di fondazione (insufficiente trattamento).

Questi movimenti sono in genere differenziali e portano allo sviluppo di effetti arco con riduzione degli sforzi effettivi in talune parti del rilevato, originando fessurazioni interne.

La filtrazione si diffonde in tali fessure e lungo la parete di contatto, promuovendo erosione interna e rottura sulla parte di rilevato adiacente.

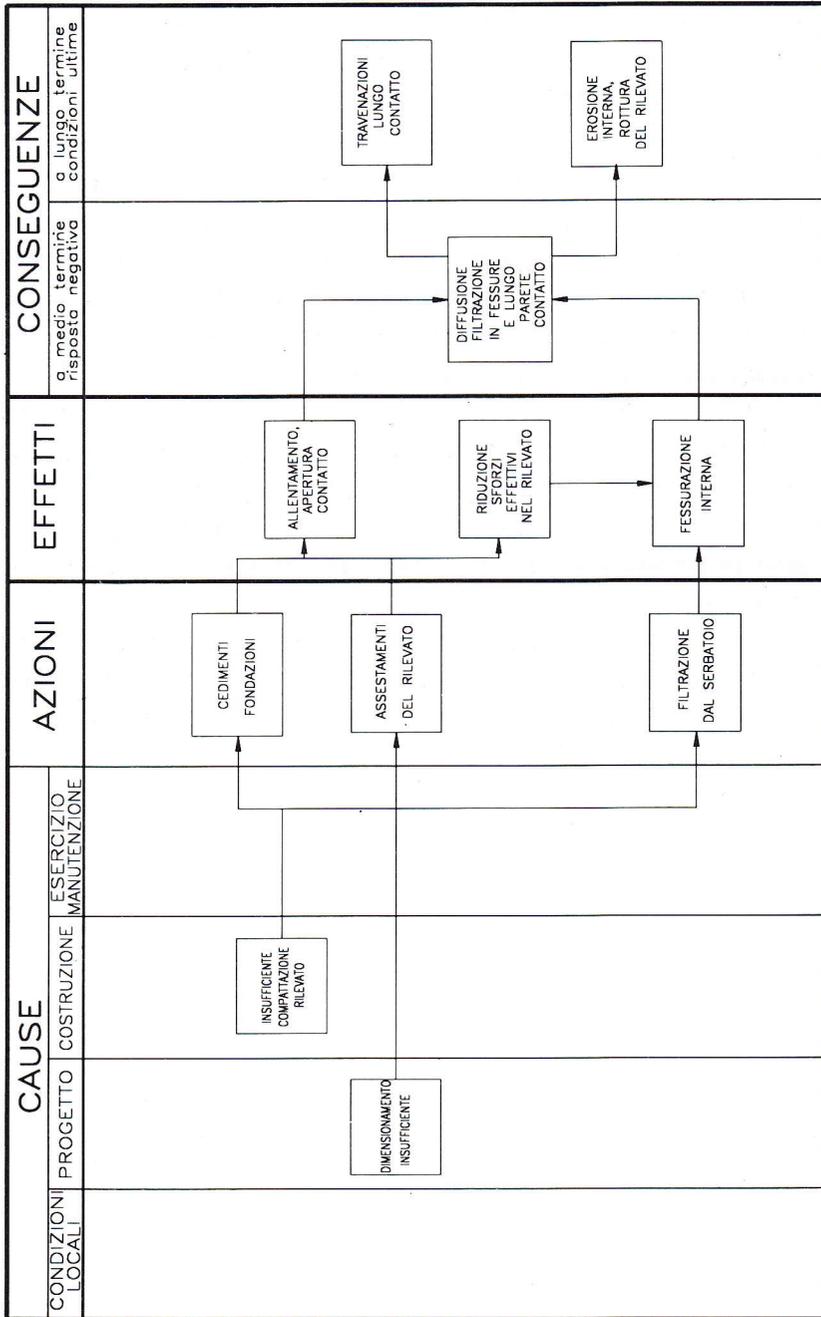
Ove la zona di contatto è col nucleo, le dimensioni trasversali ridotte di questo e la scarsa efficienza del sistema dei filtri possono creare condizioni favorevoli allo sviluppo del fenomeno.

DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI

RILEVATO

PROCESSO 23

PERDITA DI COLLEGAMENTO TRA
RILEVATO E STRUTTURE MURARIE



PARTE IV
OPERE ANNESSE

24 *EROSIONE PER DISSIPAZIONE DI ENERGIA CINETICA*

È causata dall'impatto delle acque contro il fondo vallivo in occasione dell'evacuazione di grosse piene da organi scaricatori.

L'energia cinetica della corrente idrica viene dissipata di norma al piede di valle della diga in un bacino costituito da terreno in posto, preferibilmente roccia viva, o da una vasca di calma in calcestruzzo; l'energia viene in parte assorbita dal fondo e dalle pareti del bacino, in parte va dispersa sotto forma di calore.

L'impatto determina severi sforzi, azione erosiva e sottopressioni nelle parti in cui si verifica lo smorzamento e ciò può portare alla sotto-escavazione del piede di valle della diga in particolare se lo scarico e la disposizione non sono stati adeguatamente studiati (ad es. con modello) in sede di progetto.

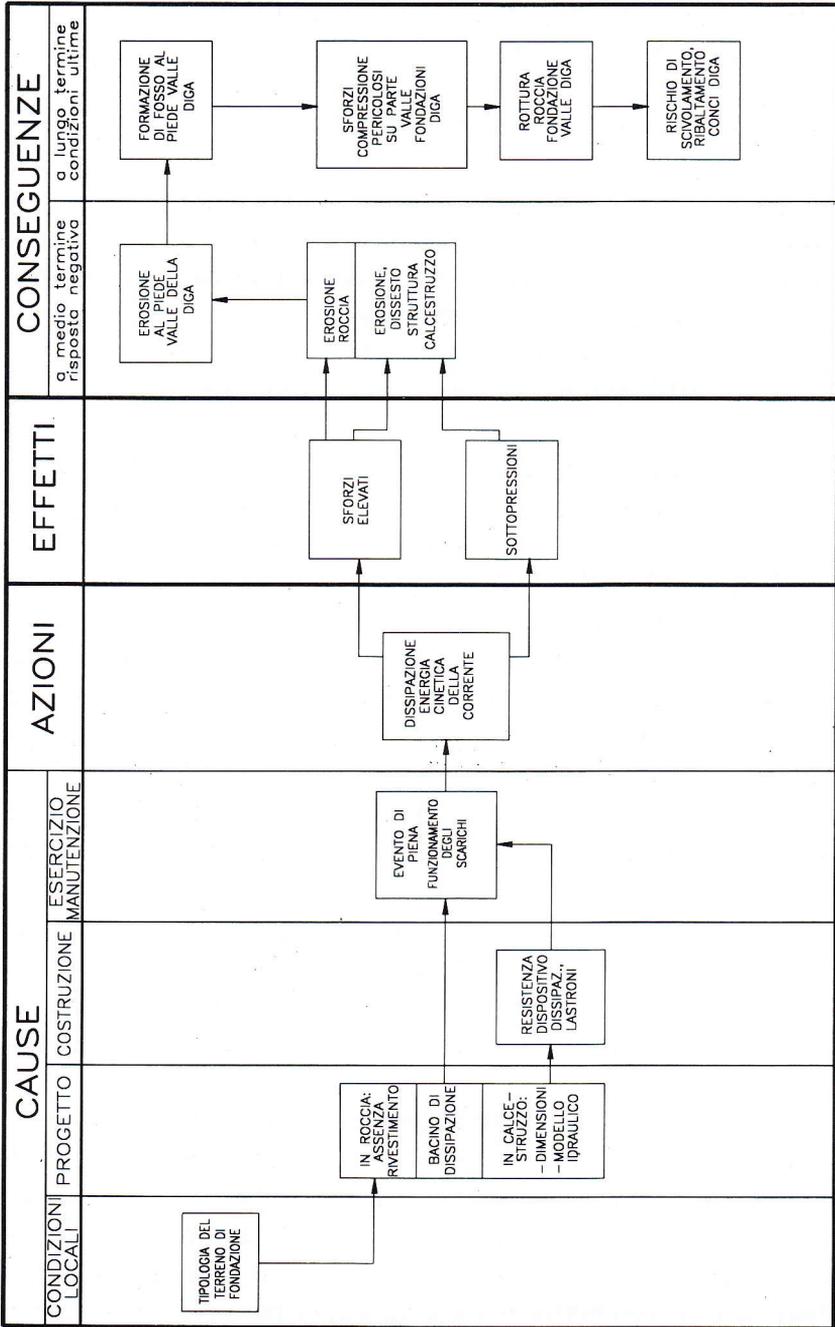
Fattori influenti sul processo sono: altezza di caduta della corrente, qualità del terreno che riceve l'impatto, distanza tra zona di impatto e diga, frequenza d'uso dello scarico, entità e durata delle piene.

Se il terreno costituente il bacino di impatto è tenero, non ha caratteristiche meccaniche adeguate o non è protetto, l'escavazione di una grande fossa è un pericolo effettivo. La sollecitazione di compressione sulla parte di valle della fondazione della diga può arrivare a valori pericolosi, con rischio di slittamenti e ribaltamento di elementi della diga per rottura della fondazione. Nelle vasche di calma in calcestruzzo si ha erosione quando le dimensioni della vasca sono insufficienti e la platea di fondo non è abbastanza resistente, e cioè di insufficiente spessore, priva di armatura e non drenata; i lastroni formanti platea possono sollevarsi, le strutture di dissipazione essere asportate.

L'azione erosiva illustrata può essere incrementata da effetti di abrasione ed urto, quando la piena trasporta materiale solido proveniente da erosione dei terreni a monte, oppure corpi solidi galleggianti. L'azione del materiale solido nel bacino di dissipazione è incrementata dalla formazione di moti vorticosi, dipendenti in genere da una dissimetria nell'apertura delle paratoie sovrastanti e dalla geometria del bacino di dissipazione e se l'evacuazione del materiale solido più a valle risulta difficoltosa.

PROCESSO 24

EROSIONE PER DISSIPAZIONE
DI ENERGIA CINETICA



25 *EROSIONE PER ABRASIONE*

Si verifica in genere in occasione di piene, quando la corrente idrica evacuata del serbatoio trasporta particelle solide (in sospensione o al fondo). Queste sviluppano azione erosiva per urto e sfregamento contro le pareti del condotto e vasca; l'effetto è più pronunciato se la corrente è vorticosa ed animata da moti rotazionali.

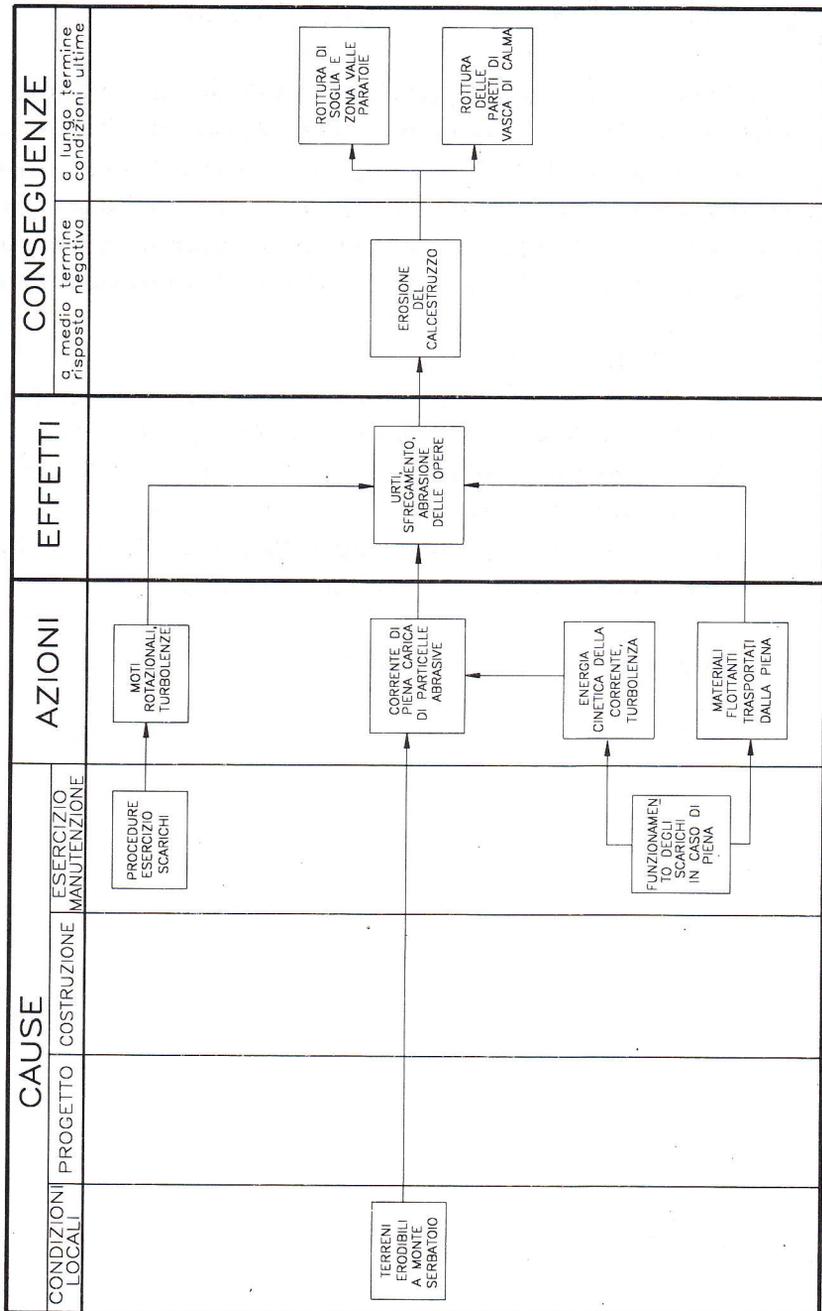
La presenza di terreni erodibili a monte del serbatoio favorisce il processo e la sua persistenza.

Sedi tipiche dell'erosione sono:

- sezioni di scarico, specie se sono presenti bruschi cambiamenti di direzione; soglie e zone a valle di paratoie;
- vasche di calma al piede di scivoli di scarichi di superficie: l'azione abrasiva del materiale solido è favorita dalla formazione di moti vorticosi per dissimmetrica apertura di paratoie, e nel caso che non sia facilitata l'evacuazione del materiale solido verso valle.

Abrasione è causata anche da urto di corpi flottanti in occasione di piene.

PROCESSO 25



26 *EROSIONE PER CAVITAZIONE*

Il fenomeno di cavitazione avviene quando, in prossimità delle pareti solide di un condotto, una importante caduta di pressione si verifica in seno alla corrente idrica. Si ha separazione di aria disciolta e violento sviluppo di vapore acqueo in forma di bolle, il cui continuo formarsi e distruggersi dà luogo a rapidissima successione di scoppi ed urti, che sottopongono le pareti ad una intensa azione erosiva.

Cavitazione si manifesta:

- a valle di paratoie degli scarichi in pressione e di superficie, per motivi di aerazione della vena o per variazioni brusche della geometria del condotto, specie se le paratoie sono utilizzate in parziale apertura;
- sugli scivoli di scarichi di superficie, per distacco della vena causa una inadatta geometria dello scivolo.

PROCESSO 26

