



Direttiva sulla sicurezza degli impianti di accumulazione

Parte C1: Dimensionamento e costruzione

Avvertenza: questo documento è un'anteprima di stampa della parte C1 della direttiva sulla sicurezza degli impianti di accumulazione, revisione 2014-2016.

L'ultima versione sostituisce le precedenti

Versione	Modifica	Data
2.0	Revisione totale della direttiva dell'UFAEG 2002	15.01.2017
2.1	Correzione della formula al capitolo 4.6.6.3	28.8.2017



Nota editoriale

Pubblicazione

Ufficio federale dell'energia, Sezione Vigilanza sugli impianti di accumulazione, 3003 Berna

Elaborazione

Gruppo di lavoro per la revisione della parte C1

M. Conrad	AF-Consult Switzerland AG, Comitato svizzero delle dighe CSD
G. R. Darbre	Ufficio federale dell'energia UFE
A. Fankhauser	Kraftwerke Oberhasli AG, KWO
J. M. Fasel	Norbert S.A.
R. M. Gunn	Ufficio federale dell'energia UFE
M. Hoonakker	Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages, BETCGB, Francia
R. Panduri	Ufficio federale dell'energia UFE
F. Vuilleumier	BG Ingénieurs Conseils S.A.

Controllo

Gruppo centrale di lavoro per la revisione delle direttive:

A. Baumer	Comitato svizzero delle dighe CSD
R. Boes	ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW
G. Darbre	Ufficio federale dell'energia UFE
S. Gerber	Ufficio federale dell'energia UFE
H. Meusburger	Conferenza dei direttori cantonali dei lavori pubblici, della pianificazione e dell'ambiente DCPA
T. Oswald	Ufficio federale dell'energia UFE
B. Otto	Associazione svizzera di economia delle acque ASEA
R. Panduri	Ufficio federale dell'energia UFE
M. Perraudin	Associazione delle aziende elettriche svizzere AES
A. Schleiss	Laboratoire de constructions hydraulique, LCH-PFL
A. Truffer	Conferenza dei direttori cantonali dell'energia CdEN

Documento approvato dalla direzione dell'UFE il 13 dicembre 2016.

Data

Prima pubblicazione (versione 2.0): 15 gennaio 2017



Indice

1. Introduzione	5
2. Procedura applicabile	5
2.1. Approvazione dei piani (art. 6 LImA)	5
2.2. Infilso delle costruzioni sotterranee	6
2.3. Analisi della sicurezza di un impianto esistente.....	6
3. Convenzione d'utilizzazione, base del progetto e dossier della domanda di approvazione dei piani	7
3.1. Convenzione d'utilizzazione	7
3.2. Base del progetto.....	7
3.3. Dossier della domanda di approvazione dei piani per un progetto di costruzione o di modifica di un impianto	8
3.4. Compiti dell'autorità di vigilanza nel quadro dell'approvazione di un progetto di costruzione o modifica di un impianto	10
3.5. Collaudo dei lavori di costruzione da parte dell'autorità di vigilanza (art. 9 cpv. 3 OlmA)	11
4. Sicurezza strutturale	11
4.1. Oggetto della sicurezza strutturale	11
4.2. Verifica dell'integrità strutturale	12
4.3. Combinazioni di azioni	12
4.4. Descrizione delle azioni individuali	15
4.4.1. Peso proprio	15
4.4.2. Pressione dell'acqua	15
4.4.3. Sottopressioni	16
4.4.4. Pressioni interstiziali	16
4.4.5. Variazioni della temperatura del calcestruzzo	16
4.4.6. Pressione della terra e rinfianco di valle	16
4.4.7. Pressione dei sedimenti	17
4.4.8. Terremoto	17
4.4.9. Pressione del ghiaccio	17
4.4.10. Valanga.....	18
4.4.11. Colate detritiche	18
4.5. Altre azioni individuali	19
4.5.1. Ancoraggi.....	19
4.5.2. Carichi rotabili	19
4.5.3. Impatto da imbarcazioni	19
4.5.4. Rigonfiamento di origine chimica del calcestruzzo	19
4.5.5. Scorrimento viscoso, ritiro, rilassamento e assestamento	20
4.5.6. Caduta di un aeromobile su un'opera di sbarramento	20
4.5.7. Sovrastrutture	20
4.6. Criteri di integrità strutturale	20
4.6.1. Principi di base.....	20
4.6.2. Classi d'impianti di accumulazione.....	21
4.6.3. Determinazione delle caratteristiche dei materiali	22
4.6.4. Elementi di modellizzazione	23
4.6.5. Coefficienti parziali di resistenza	25
4.6.6. Stabilità d'insieme	26
4.6.7. Resistenza ultima dell'opera di sbarramento	28
4.6.8. Area della fondazione	29
4.6.9. Stabilità dei versanti dell'area della ritenuta	29
5. Considerazioni costruttive particolari.....	30
5.1. Vegetazione sulle dighe in materiale sciolto.....	30



5.2. Costruzioni sulle dighe in materiale sciolto.....	30
6. Protezione dagli atti di sabotaggio (art. 6 cpv. 7 LImA)	31
7. Smantellamento di un impianto	31
8. Bibliografia	32

Indice degli allegati

Allegato 1 Procedura volta a prevenire la compromissione della sicurezza di un impianto di accumulazione in caso di costruzione sotterranea nelle vicinanze	33
Allegato 2 Requisiti («condizioni») tipici da soddisfare prima, durante o al termine dei lavori	34
Allegato 3 Forme convenzionali dei diagrammi delle sottopressioni.....	35
Allegato 4 Definizione delle tre classi d'impianti di accumulazione.....	36



1. Introduzione

La presente parte C1 della direttiva tratta tutti gli aspetti inerenti alla sicurezza strutturale degli impianti di accumulazione (art. 5 e 6 LImA e capitolo 2 sezione 1 OImA), ad eccezione dei casi di carico specifici per le piene e i dispositivi di scarico (cfr. parte C2 della direttiva) e di quelli specifici per i terremoti (cfr. parte C3 della direttiva). La parte C1 della direttiva si applica a tutti i tipi di impianto, indipendentemente dalla dimensione, dallo scopo e dal gestore, nell'ambito

- dell'elaborazione di un nuovo progetto e della costruzione di un nuovo impianto;
- della modifica di un impianto esistente;
- dell'analisi della sicurezza di un impianto esistente.

L'attuazione delle indicazioni di questa parte della direttiva deve essere adattata alle particolarità dell'impianto considerato, nei limiti delle disposizioni legali della LImA e dell'OImA.

2. Procedura applicabile

2.1. Approvazione dei piani (art. 6 LImA)

La costruzione di un nuovo impianto, la modifica di un impianto esistente e l'esecuzione di lavori di revisione¹ necessitano di un'approvazione da parte dell'autorità di vigilanza per gli aspetti inerenti alla sicurezza tecnica. I documenti inerenti alla sicurezza tecnica che il richiedente deve trasmettere nell'ambito della sua domanda di approvazione sono riportati nel capitolo 3.3.

Al fine di coordinare le procedure, l'approvazione propriamente detta («approvazione dei piani») è rilasciata dall'autorità cantonale o federale competente se l'autorizzazione è richiesta sulla base di una legislazione diversa dalla LImA (ad esempio la procedura cantonale di autorizzazione a costruire). Il richiedente allega tutti i documenti necessari per la valutazione della sicurezza tecnica alla domanda da presentare all'autorità d'approvazione². Quest'ultima richiede all'autorità di vigilanza di formulare una presa di posizione sugli aspetti inerenti alla sicurezza tecnica e include nella propria decisione globale («approvazione dei piani») le conclusioni formulate dall'autorità di vigilanza e le condizioni che ne derivano.

Se l'autorizzazione è richiesta unicamente sulla base della LImA, il richiedente trasmette la domanda direttamente all'autorità di vigilanza che, dopo aver esaminato il dossier e verificato il rispetto dei requisiti di sicurezza tecnica, rilascia direttamente l'approvazione dei piani.

Si raccomanda al richiedente di contattare l'autorità di vigilanza nelle fasi preliminari del progetto, al fine di definire insieme i requisiti per le basi dello stesso nonché pianificare la consegna diretta dei documenti tecnici e il relativo esame. Ciò consente un'elaborazione rapida della domanda dal momento in cui è stata depositata una domanda formale di approvazione.

¹ Il capitolo 6.1 della parte D della direttiva specifica i lavori di revisione interessati.

² Si distingue tra «l'autorità di vigilanza» che vigila unicamente sul rispetto dei requisiti di sicurezza tecnica secondo la LImA e la OImA, e «l'autorità d'approvazione» che rilascia un'autorizzazione di costruzione («approvazione dei piani») concernente tutti gli aspetti da considerare in questo ambito (ad esempio gli aspetti ambientali); il risultato dell'esame della sicurezza tecnica svolto dall'autorità di vigilanza è uno di questi aspetti.



2.2. Influsso delle costruzioni sotterranee

A causa dell'effetto drenante, una costruzione sotterranea situata nell'area della fondazione di un'opera di sbarramento (in particolare una galleria) può provocare delle deformazioni degli appoggi, che a loro volta generano tensioni interne dell'opera di sbarramento. A seconda della situazione (tipo di costruzione sotterranea, condizioni idrogeologiche, tipo di opera di sbarramento) tali tensioni possono mettere a rischio la sicurezza dell'impianto di accumulazione.

Prima di approvare una tale costruzione, l'autorità d'approvazione competente deve consultare l'autorità di vigilanza (art. 9 LImA). Quest'ultima decide per ogni singolo caso se occorre studiare l'impatto previsto della costruzione sulla sicurezza dell'impianto di accumulazione e se vanno adottate misure volte a prevenire una fuoriuscita incontrollata di acqua dalla ritenuta. La procedura dell'**Allegato 1** funge da linea guida a tal fine.

2.3. Analisi della sicurezza di un impianto esistente

Il gestore deve effettuare un'analisi della sicurezza tecnica dell'impianto nella sua totalità o di una sua parte (opera di sbarramento e relative fondazioni, zona della ritenuta, opere ausiliarie rilevanti per la sicurezza), in particolare:

- per tenere conto dei cambiamenti dello stato della scienza e della tecnica in materia;
- per tenere conto dei cambiamenti delle ipotesi di una precedente verifica della sicurezza, anche delle ipotesi riguardanti la modalità d'esercizio della ritenuta;
- su ordine dell'autorità di vigilanza³.

Se stimano che sussiste una delle condizioni summenzionate e quindi una tale analisi è necessaria, il professionista esperto e i periti includono questa circostanza nei loro rapporti di sicurezza.

Le verifiche della sicurezza tecnica con esito positivo effettuate conformemente alla documentazione di base concernente la sicurezza strutturale del 2002 e della corrispondente parte della direttiva del 2002 restano valide; esse non devono essere ripetute a seguito della presente revisione.

³ Il gestore che contesta l'ordine di esecuzione dell'autorità di vigilanza o le sue conclusioni può esigere da essa una decisione motivata con l'indicazione delle vie ricorsuali.



3. Convenzione d'utilizzazione, base del progetto e dossier della domanda di approvazione dei piani

3.1. Convenzione d'utilizzazione

La convenzione d'utilizzazione descrive gli obiettivi di utilizzazione stabiliti dal committente, come pure le condizioni, i requisiti e le prescrizioni fondamentali relative all'elaborazione del progetto nonché alla costruzione e all'utilizzo dell'impianto. Gli elementi necessari per comprendere gli scopi e le condizioni d'esercizio di un impianto, come pure quelli rientranti nelle verifiche della sicurezza tecnica, devono essere trasmessi per conoscenza all'autorità di vigilanza. La convenzione d'utilizzazione e i relativi aggiornamenti fanno parte del dossier dell'impianto allestito dal gestore al più tardi nell'ambito della preparazione della messa in esercizio dell'impianto (art. 22, cpv. 2, lett. b OImA). Per gli impianti esistenti, questi elementi possono essere inclusi in altri documenti tecnici (ad esempio monografia sull'impianto).

Gli elementi menzionati sono in particolare gli elementi che descrivono:

- lo scopo dell'impianto di accumulazione (scopo principale e secondario dell'impianto con obiettivi d'esercizio⁴);
- l'ubicazione (su piani della situazione e con descrizione: opera di sbarramento e opere ausiliarie, zona della ritenuta, bacino imbrifero);
- le condizioni legate all'ubicazione (condizioni topografiche, geologiche, idrologiche, o legate a pericoli naturali);
- le disposizioni strutturali (tipo e dimensioni dell'opera di sbarramento);
- i requisiti legali particolari e la documentazione tecnica di base (in particolare i requisiti secondo la legislazione sugli impianti di accumulazione e secondo la concessione rilasciata).

3.2. Base del progetto

La base del progetto definisce i dati tecnici specifici dell'impianto. Essa costituisce la descrizione tecnica della trasposizione della convenzione d'utilizzazione riferita in maniera specifica all'impianto in questione. Gli elementi inerenti alla sicurezza tecnica devono essere ripresi come parte integrante dei piani, dei calcoli statici, dei calcoli idraulici e di altre verifiche di sicurezza del dossier della domanda di approvazione dei piani trasmessa all'autorità di vigilanza. Si raccomanda al richiedente di far convalidare questi elementi all'autorità di vigilanza prima di elaborare i piani dettagliati ed eseguire le analisi della sicurezza. Si tratta in particolare:

- delle basi idrologiche e del metodo di verifica della sicurezza contro le piene;
- del rischio sismico e del metodo di verifica della sicurezza sismica;
- degli studi di sicurezza specifici del sito e dell'impianto di accumulazione.

⁴ Ad esempio il periodo di ritorno dei pericoli naturali dai quali un impianto protegge la popolazione o deflussi da turbinaggio e potenza installata per un impianto idroelettrico.



3.3. Dossier della domanda di approvazione dei piani per un progetto di costruzione o di modifica di un impianto

Il dossier della domanda di approvazione dei piani destinato all'autorità di vigilanza per un progetto di costruzione o modifica di un impianto deve contenere tutte le indicazioni tecniche volte a dimostrare che l'impianto pianificato è dimensionato e verrà costruito conformemente allo stato della scienza e della tecnica, in modo da garantirne la sicurezza in tutti i casi prevedibili di carico e d'esercizio. Ogni modifica con rilevanza sulla sicurezza tecnica successiva al progetto approvato necessita di una precedente autorizzazione da parte dell'autorità di vigilanza o dell'autorità d'approvazione.

Le indicazioni che il richiedente deve trasmettere coincidono in generale con gli elementi della Tabella 3-1 con un adattamento alle particolarità e all'entità del progetto depositato:

1. Rapporto tecnico (elementi della convenzione d'utilizzazione e della base del progetto)
1.1 Elementi fondamentali
1.1.1 Descrizione del progetto di costruzione o di modifica d'impianto (opera di sbarramento, ritenuta, opere ausiliarie)
1.1.2 Scopo (attribuzione e tipo di utilizzazione, durata di utilizzo prevista)
1.2 Situazione e condizioni quadro
1.2.1 Impianti e infrastrutture esistenti
1.2.2 Topografia, quadro geomorfologico
1.2.3 Condizioni del sottosuolo (fondazione, ritenuta): geologia, tettonica, geotecnica, idrogeologia
1.2.4 Sismicità generale del sito
1.2.5 Pericoli naturali (in particolare scorrimenti, frane rocciose, colate detritiche, valanghe, distacchi di ghiaccio, rottura di un lago glaciale, apporti sedimentari, rischio di cedimento su terreno carsico)
1.2.6 Idrologia (bacini imbriferi, captazioni, intensità delle piogge, deflussi)
1.2.7 Curva di riempimento della ritenuta, livello normale della ritenuta, altezza d'invaso, volume della ritenuta
1.2.8 Materiale detritico, concetto di gestione dei sedimenti se rilevante per la sicurezza dell'impianto
1.2.9 Prelievi di materiale (fonti e cave, qualità dei materiali)
1.2.10 Ulteriori requisiti e condizioni specifici del progetto (ad esempio costruzioni nelle vicinanze, anche sotterranee)
2. Analisi strutturale e verifiche della sicurezza
2.1 Elementi del sistema portante
2.1.1 Sistema portante (compresi aspetti della fondazione, opere ausiliarie e rive): tipo, dimensioni, dettagli costruttivi importanti
2.1.2 Disposizioni costruttive (giunti, contatto calcestruzzo-roccia ¹⁾)
2.1.3 Caratteristiche dei materiali dell'opera di sbarramento (risultati di prove in laboratorio, inclusi i parametri entranti nelle verifiche ¹⁾)
2.1.4 Caratteristiche dei materiali della fondazione; iniezioni previste, drenaggi
2.1.5 Metodo di costruzione
2.1.6 Opere ausiliarie rilevanti per la sicurezza



2.2 Verifiche della sicurezza strutturale
2.2.1 Basi di calcolo; azioni individuali, combinazioni di azioni
2.2.2 Modellizzazione, calcoli
2.2.3 Verifiche statiche dell'opera di sbarramento (stabilità d'insieme e resistenza ultima, anche della fondazione)
2.2.4 Stabilità delle rive, onde di impulso ^{*)}
2.2.5 Sicurezza sismica (opera di sbarramento, ritenuta, opere ausiliarie)
2.3 Verifiche della sicurezza contro le piene nonché degli sfioratori e dei dispositivi di scarico
2.3.1 Idrografia degli afflussi e deflussi (laminazione), determinazione della piena di dimensionamento e della piena di sicurezza
2.3.2 Dimensionamento degli sfioratori e dei dispositivi di scarico (capacità, bordo franco, idraulica), livello di pericolo
2.3.3 Determinazione della piena da deviare durante i lavori di revisione o costruzione
2.4 Pianificazione in caso di emergenza
2.4.1 Mappa di inondazione in caso di rottura dell'opera di sbarramento
2.4.2 Componenti del dispositivo di allarme
2.5 Strumentazione, concetto di sorveglianza, controlli
2.5.1 Strumentazione e concetto di sorveglianza durante l'esercizio ^{*)} e durante i lavori (descrizione, schemi)
2.5.2 Programma delle prove per il controllo dei materiali durante i lavori
3. Ulteriori elementi propri alle modifiche di impianti
3.1 Legame con la struttura esistente, misure costruttive nel contatto «vecchio/nuovo»
3.2 Sorveglianza dell'impianto esistente durante i lavori
3.3 Sicurezza in caso di piena durante i lavori
3.4 Limitazioni d'esercizio durante i lavori
4 Piani e programma dei lavori
4.1 Situazione, planimetria, quote, sezioni, dettagli costruttivi
4.2 Programma provvisorio dei lavori

*) Generalmente l'autorità di vigilanza può accettare che le indicazioni risultanti da questi elementi le siano trasmesse anche dopo il rilascio dell'approvazione dei piani, ma comunque prima dell'inizio dei lavori.

Tabella 3-1: Elementi inerenti alla sicurezza tecnica generalmente da allegare alla domanda di approvazione dei piani



3.4. Compiti dell'autorità di vigilanza nel quadro dell'approvazione di un progetto di costruzione o modifica di un impianto

L'autorità di vigilanza esamina i documenti ricevuti dal punto di vista della sicurezza tecnica (prevenzione della fuoriuscita incontrollata di masse d'acqua e gestione del rischio residuo), escludendo ogni altro aspetto⁵, e precisamente verifica che:

- il dossier trasmesso contenga tutti i documenti e tutte le informazioni necessarie per valutare la sicurezza tecnica. Nel fare ciò può far riferimento al capitolo 3.3;
- siano previste le misure costruttive necessarie a garantire la sicurezza tecnica, in particolare
 - o uno scarico di fondo o una paratoia di fondo di capacità sufficiente (cfr. direttiva parte C2);
 - o le misure di protezione contro gli atti di sabotaggio (cfr. capitolo 6);
- il dimensionamento, le analisi della sicurezza e la modalità di costruzione prevista siano conformi allo stato della scienza e della tecnica (nel fare ciò può far riferimento alle diverse parti della presente direttiva). A tal fine, essa verifica in particolare
 - o l'idoneità delle modalità di analisi scelte;
 - o l'esattezza delle ipotesi di partenza;
 - o la plausibilità dei risultati ottenuti;
- l'ubicazione della strumentazione (compresa le rete geodetica) sia adeguata;
- sia stata pianificata l'installazione di un dispositivo d'allarme acqua (se richiesto);
- sia stata pianificata la consegna dei documenti aggiuntivi richiesti prima dell'inizio dei lavori e durante la loro esecuzione.

Se il dossier è completo e i requisiti in materia di sicurezza tecnica sono soddisfatti l'autorità di vigilanza approva il progetto secondo il capitolo 2.1.

Se necessario dal punto di vista della sicurezza tecnica, l'autorità di vigilanza formula dei requisiti che il richiedente deve soddisfare («condizioni»), inclusi nell'approvazione dei piani. Tali requisiti possono concernere gli elementi dell'**Allegato 2**.

Si ricorda inoltre al richiedente che (cfr. parte D della direttiva):

- l'approvazione dei piani non costituisce un'autorizzazione di messa in esercizio né di esercizio;
- le condizioni preliminari per l'ottenimento dell'autorizzazione di messa in esercizio sono: un programma di messa in esercizio, un regolamento di manovra delle paratoie e un regolamento d'emergenza redatti dal gestore e approvati dall'autorità di vigilanza;
- un regolamento di sorveglianza redatto dal gestore e approvato dall'autorità di vigilanza è una condizione preliminare per l'esercizio.

⁵ Le questioni concernenti in particolare la scelta tra varianti nell'ambito di un progetto di costruzione (sempre che queste varianti soddisfino i criteri di sicurezza), l'ambiente, i deflussi residuali e restituiti, l'esercizio, la gestione e la sicurezza sul lavoro non sono di competenza dell'autorità di vigilanza.



3.5. Collaudo dei lavori di costruzione da parte dell'autorità di vigilanza (art. 9 cpv. 3 OImA)

Terminati i lavori di costruzione, l'autorità di vigilanza controlla che

- il richiedente le abbia trasmesso tutti i documenti inerenti alla sicurezza tecnica stabiliti nell'approvazione dei piani o da essa richiesti prima, durante o al termine dei lavori di costruzione;
- siano soddisfatti tutti i requisiti imposti («condizioni») inerenti alla sicurezza tecnica;
- i lavori siano stati eseguiti conformemente ai piani approvati o, eventualmente, alle modifiche approvate⁶.

L'autorità di vigilanza riassume i risultati del proprio controllo in un verbale di collaudo dei lavori, condizione preliminare per l'ottenimento di un'autorizzazione di messa in esercizio (cfr. capitolo 2.2 della parte D della direttiva).

Se i lavori svolti non sono conformi ai piani approvati (o alle relative modifiche approvate), essa stabilisce se è necessario avviare una procedura di domanda d'approvazione dei piani per gli elementi non conformi. In questo caso, come pure nel caso manchino dei documenti o non siano soddisfatte delle condizioni, l'autorità di vigilanza può rimandare la redazione del verbale sino al momento in cui la situazione verrà regolarizzata oppure stabilire nel verbale dei termini per la trasmissione dei documenti mancanti.

4. Sicurezza strutturale

4.1. Oggetto della sicurezza strutturale

La sicurezza strutturale è volta ad assicurare che un impianto di accumulazione resista a tutti i casi prevedibili di carico e d'esercizio al fine di prevenire una fuoriuscita incontrollata e dannosa di grandi quantità d'acqua. Spetta ai richiedenti e ai gestori adottare le misure costruttive ed effettuare tutte le verifiche a tal fine necessarie. Queste ultime includono in generale la verifica dei seguenti elementi:

- a) passaggio delle piene e capacità sufficiente degli sfioratori e dei dispositivi di scarico;
- b) integrità strutturale dell'opera di sbarramento e delle opere ausiliarie rilevanti per la sicurezza, come pure delle loro fondazioni e dell'area della ritenuta durante l'esercizio regolare, anche durante e dopo un evento straordinario o estremo (terremoto ecc.).

La verifica della sicurezza in caso di piena e i requisiti relativi alla capacità degli sfioratori e dei dispositivi di scarico sono oggetto della parte C2 della direttiva e non vengono trattati nella presente parte C1.

⁶ L'autorità ritiene sufficiente anche una valutazione sommaria, senza controlli dettagliati (ad esempio controlli delle dimensioni esatte tramite misurazioni).



4.2. Verifica dell'integrità strutturale

La verifica dell'integrità strutturale generalmente deve essere effettuata per i seguenti stati limite ultimi, conformemente allo stato della scienza e della tecnica⁷:

- stabilità d'insieme dell'opera di sbarramento nella sua totalità o di una sua parte oppure di un'opera ausiliaria rilevante per la sicurezza (cfr. capitolo 4.6.6);
- resistenza ultima dell'opera di sbarramento nella sua totalità o di una sua parte oppure di un'opera ausiliaria rilevante per la sicurezza (stabilità interna; cfr. capitolo 4.6.7);
- resistenza ultima dell'area della fondazione (stabilità interna; cfr. capitolo 4.6.8);
- stabilità dei versanti della zona della ritenuta (cfr. capitolo 4.6.9).

Per gli impianti esistenti, gli elementi che influiscono sulla sicurezza di un impianto di accumulazione (cedimenti, fessurazione, colmataggio dei drenaggi ecc.) devono essere considerati in queste verifiche, generalmente sotto forma di condizioni iniziali della verifica dell'integrità strutturale dell'impianto.

4.3. Combinazioni di azioni

Le seguenti combinazioni di azioni individuali generalmente devono essere considerate nella verifica dell'integrità strutturale di un impianto di accumulazione, sempre che siano pertinenti per l'impianto e il sito in esame; esse vanno associate in modo da generare la sollecitazione più severa possibile per l'impianto. Se altre azioni possono colpire in modo non trascurabile la stabilità di un impianto o se altre combinazioni di azioni possono portare a risultati più sfavorevoli nella verifica della sicurezza strutturale, anch'esse dovranno essere considerate in base ai medesimi principi.

Le combinazioni di azioni sono classificate e definite secondo le tabelle seguenti:

Normale (tipo 1)	Concernente le azioni che sollecitano regolarmente l'opera di sbarramento
Straordinaria (tipo 2)	Concernente le azioni che possono verificarsi, ma non necessariamente, durante la vita dell'impianto. In questo caso sono tollerati dei lievi danni. I dispositivi di sicurezza (in particolare scarichi di superficie e dispositivi di scarico) devono rimanere operativi.
Estrema (tipo 3)	Concernente le azioni più sfavorevoli in presenza delle quali deve essere garantita la sicurezza strutturale dell'impianto (ipotizzando che non si verifichino simultaneamente né due azioni individuali estreme né un'azione individuale estrema e un'azione individuale straordinaria). In questo caso possono verificarsi dei danni senza tuttavia provocare una fuoriuscita incontrollata e dannosa di acqua (è invece generalmente necessario effettuare controlli approfonditi e interventi costruttivi al fine di ristabilire il livello di sicurezza adeguato).

Tabella 4-1: Tipi di combinazioni di azioni

⁷ Per la definizione cfr. parte A della direttiva.



Azioni individuali	Combinazioni di azioni per le dighe a gravità (in calcestruzzo e in muratura), ad arco e per le traverse mobili, compresi appoggi e fondazioni						
	Combinazioni di tipo normale (tipo 1)		Combinazioni di tipo straordinario (tipo 2)			Combinazioni di tipo estremo (tipo 3)	
	Bacino vuoto	Bacino pieno	Piena di dimensionamento	Ghiaccio	Valanga o colata detritica	Statica	Dinamica
						Piena di sicurezza	Sollecitazione sismica
Peso proprio ⁱⁱ⁾	X	X	X	X	X	X	X
Pressione idrostatica, livello di ritenuta normale ⁱ⁾		X		X	(X)		X
Pressione idrostatica corrispondente al livello di piena			X			X	
Pressione idrostatica a valle (eventuale) ^{v)}	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
Pressione dei sedimenti a monte (eventuale)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
Pressione della terra a valle (eventuale)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)
Sollecitazione sismica							X
Pressione dei ghiacci				X			(X)
Pressione da valanga o colata detritica					X		
Azioni supplementari da considerare per le dighe a gravità (in calcestruzzo e in muratura) e le traverse mobili ⁱⁱⁱ⁾							
Sottopressioni, livello di ritenuta normale ⁱⁱⁱ⁾		X		X	(X)		X
Sottopressioni corrispondenti al livello di piena ⁱⁱⁱ⁾			X			X	
Azioni supplementari da considerare per le dighe ad arco ^{iv)}							
Oscillazioni di temperatura ^{iv)}	X	X	X	X	X	X	X
Osservazioni	<p>i) Livello di ritenuta normale: per gli impianti operativi livello massimo d'esercizio; per gli altri impianti livello determinante per la definizione dell'altezza d'invaso secondo la parte A della direttiva. Deve essere considerato anche un livello di riempimento intermedio se esso provoca sollecitazioni più elevate.</p> <p>ii) Peso proprio: le fasi di costruzione e di serraggio dei giunti devono essere considerate in modo adeguato nelle dighe ad arco.</p> <p>iii) Nelle verifiche della stabilità globale delle dighe ad arco generalmente le sottopressioni possono essere trascurate. In caso contrario, vanno considerate analogamente alle dighe a gravità.</p> <p>iv) Le oscillazioni di temperatura generalmente possono essere trascurate nella verifica della stabilità di dighe a gravità data l'assenza di sovradeterminazione del sistema statico globale; in caso contrario, vanno considerate analogamente alle dighe ad arco. Gli effetti termici possono inoltre provocare tensioni di secondo ordine, in particolare a livello delle pareti delle gallerie, come pure vicino al contatto calcestruzzo-roccia.</p> <p>v) La pressione idrostatica a valle dev'essere combinata con la pressione idrostatica a monte nel modo più sfavorevole possibile.</p> <p>X Azione individuale da considerare nella combinazione.</p> <p>(X) Da considerare a seconda dei casi.</p>						
Nota	a) Le altre azioni individuali (cfr. capitolo 0) vanno considerate, a seconda delle necessità, nel modo più sfavorevole possibile.						

Tabella 4-2: Combinazioni di azioni per le dighe in calcestruzzo



Combinazioni di azioni per le dighe in materiale sciolto, compresi appoggi e fondazioni								
Azioni individuali	Combinazioni di tipo normale (tipo 1)		Combinazioni di tipo straordinario (tipo 2)				Combinazioni di tipo estremo (tipo 3)	
	Bacino vuoto (materiale sciolto drenato)	Bacino pieno	Bacino vuoto a fine costruzione	Piena di dimensionamento	Svuotamento rapido	Valanga o colata detritica	Statica	Dinamica
							Piena di sicurezza	Sollecitazione sismica
Peso proprio	X	X	X	X	X	X	X	X
Pressione idrostatica, livello di ritenuta normale ⁱ⁾		X				(X)		X
Pressioni interstiziali, livello di ritenuta normale ⁱ⁾		X			X ^{iv)}	(X)		X ⁱⁱⁱ⁾
Pressione idrostatica corrispondente al livello di piena				X			X	
Pressioni interstiziali corrispondenti al livello di piena ⁱⁱ⁾				X ⁱⁱ⁾			X ⁱⁱ⁾	
Pressioni interstiziali prima della consolidazione		(X)	X					
Sollecitazione sismica								X
Pressione da valanga o colata detritica						X		
<u>Osservazioni</u>	<p>i) Livello di ritenuta normale: per gli impianti operativi livello massimo d'esercizio; per gli altri impianti livello determinante per la definizione dell'altezza d'invaso secondo la parte A della direttiva. Deve essere considerato anche un livello di riempimento intermedio se esso provoca sollecitazioni più elevate.</p> <p>ii) Pressioni interstiziali in caso di piena: è possibile un adattamento in funzione della durata della piena e dell'efficacia dei drenaggi.</p> <p>iii) Pressioni interstiziali in caso di terremoto: secondo le indicazioni della parte C3 della direttiva.</p> <p>iv) Pressioni interstiziali in caso di svuotamento rapido: è ammessa una riduzione delle pressioni interstiziali per le dighe costituite da materiali ben drenati.</p> <p>X Azione individuale da considerare nella combinazione.</p> <p>(X) Da considerare a seconda dei casi.</p>							
<u>Nota</u>	<p>a) I casi di carico dipendono anche dai tipi di materiale sciolto.</p> <p>b) La pressione del ghiaccio generalmente non ha alcun ruolo nella verifica della stabilità delle dighe in materiale sciolto.</p> <p>c) Le altre azioni individuali (cfr. capitolo 0) vanno considerate, a seconda delle necessità, nel modo più sfavorevole possibile.</p>							

Tabella 4-3: Combinazioni di azioni per le dighe in materiale sciolto (compresi appoggi e fondazioni)



Ai fini di una verifica, se non può essere esclusa un'instabilità (generalmente individuata da un geologo) per le **rive e i versanti delle ritenute** si considerano inoltre le seguenti combinazioni:

- tipo normale (tipo 1) : peso proprio **e** pressione idrostatica (bacino pieno), sottopressioni (agenti su superfici di scorrimento, giunti, faglie ecc.) e corrispondenti pressioni interstiziali per le parti sommerse (mantenimento della pressione interstiziale e assenza di pressione idrostatica in caso di repentina variazione del livello).
- Tipo straordinario (tipo 2) : peso proprio **e** pressione idrostatica (livello piena di dimensionamento), sottopressioni (agenti su superfici di scorrimento, giunti, faglie ecc.) e le corrispondenti pressioni interstiziali per le parti sommerse (mantenimento della pressione interstiziale e assenza di pressione idrostatica in caso di repentina variazione del livello).
- Tipo estremo (tipo 3) : peso proprio **e**
 - (a) pressione idrostatica (bacino pieno), sottopressioni (agenti su superfici di scorrimento, giunti, faglie ecc.) e corrispondenti pressioni interstiziali, **sollecitazione sismica, oppure**
 - (b) pressione idrostatica (livello **piena di sicurezza**), sottopressioni (agenti su superfici di scorrimento, giunti, faglie ecc.) e corrispondenti pressioni interstiziali.

4.4. Descrizione delle azioni individuali

4.4.1. Peso proprio

I valori medi del peso specifico determinati attraverso prove di laboratorio confluiscono nella determinazione del peso proprio dei materiali. In assenza di prove di laboratorio, generalmente possono essere ammessi valori standard dalla letteratura.

4.4.2. Pressione dell'acqua

La pressione idrostatica viene considerata con un peso specifico pari a 10 kN/m^3 .



4.4.3. Sottopressioni

Le sottopressioni sono considerate nelle verifiche della stabilità delle dighe a gravità e dei cunei di roccia.

Si raccomanda di determinare le sottopressioni sulla base di un calcolo di scorrimento in cui la validità delle ipotesi può essere verificata confrontando i risultati del calcolo con i valori misurati delle sottopressioni. Particolare attenzione va prestata alle situazioni in cui le sottopressioni possono essere influenzate dalla circolazione dell'acqua nei versanti.

In assenza di misurazioni adeguate delle sottopressioni o nella fase di progetto si possono utilizzare in alternativa le seguenti distribuzioni (si veda l'**Allegato 3**):

- in assenza di schermo d'iniezione e di drenaggi: una ripartizione triangolare (senza acqua a valle) o trapezoidale (con acqua a valle), con pressioni a monte e a valle uguali alla rispettiva pressione idrostatica;
- in presenza di uno schermo d'iniezione a monte, una riduzione della pressione a livello dello schermo d'iniezione può essere considerata soltanto in caso di funzionamento di quest'ultimo, previa convalida da parte dell'autorità di vigilanza; nel caso contrario, una tale riduzione non è ammissibile;
- in presenza di un sistema di drenaggio (galleria di drenaggio, fori drenanti): una riduzione della pressione al massimo del 50% al sito del drenaggio [Obernhuber 2014, US Army Corps of Engineers 2000] (per i drenaggi perfettamente funzionanti).

4.4.4. Pressioni interstiziali

L'intensità e la ripartizione delle pressioni interstiziali all'interno del corpo di una diga in materiale sciolto, eventualmente di dighe in muratura o in calcestruzzo più permeabili (giunti di ripresa ecc.), devono essere determinate sulla base di un calcolo delle linee di flusso e degli equipotenziali, tenendo conto delle caratteristiche del materiale sciolto (precisamente la porosità e la permeabilità, considerando l'anisotropia). Le ipotesi devono essere verificate confrontando i risultati del calcolo con i valori delle pressioni interstiziali misurate per gli impianti esistenti.

4.4.5. Variazioni della temperatura del calcestruzzo

Le variazioni della temperatura media e del gradiente di temperatura lungo lo spessore delle dighe ad arco vanno considerate nelle analisi delle tensioni. Generalmente vengono considerati due stati: «estate» e «inverno», ogni volta come differenza rispetto allo stato della temperatura prevalente nell'opera di sbarramento al momento del serraggio dei giunti⁸. Le temperature associate a questi stati generalmente corrispondono alle medie pluriennali a lungo termine della stagione considerata. A seconda del comportamento dell'impianto (ad esempio distacco del piede a monte se l'inverno è molto freddo o pressione sulle spalle se l'estate è molto calda), vanno considerate temperature più distanti dalle medie pluriennali.

4.4.6. Pressione della terra e rinfianco di valle

La pressione della terra da considerare in un'analisi (attiva, passiva, a riposo) va determinata di caso in caso.

⁸ In assenza di questa informazione per gli impianti esistenti può essere utilizzata la temperatura media a lungo termine prevalente nell'impianto.



4.4.7. Pressione dei sedimenti

L'effetto della pressione dei sedimenti generalmente può essere considerato, sotto sollecitazione statica, attraverso un aumento del peso specifico dell'acqua della ritenuta pari a 4 kN/m³. Questo valore è modificabile in funzione del tipo di sedimento e della velocità dell'azione (dinamica). Questa pressione aggiuntiva dei sedimenti generalmente può essere trascurata se lo strato dei sedimenti è esiguo rispetto all'altezza determinante per il calcolo della pressione idrostatica.⁹

4.4.8. Terremoto

Il terremoto dev'essere considerato secondo le indicazioni della parte C3, a integrazione delle indicazioni della presente parte C1.¹⁰

4.4.9. Pressione del ghiaccio

L'effetto della pressione del ghiaccio sugli impianti in calcestruzzo va considerato, a meno che ci sia un sistema attivo atto a impedirne l'aderenza alla superficie dello sbarramento (ad esempio iniezione d'aria); lo stesso effetto è prodotto da una repentina variazione del livello (ad esempio cicli di riempimento giornalieri). La pressione del ghiaccio generalmente ha un ruolo importante nella parte superiore degli impianti di piccole dimensioni, mentre è trascurabile in quelli di grandi dimensioni. Per gli impianti con superficie dello sbarramento verticale o leggermente inclinata la pressione è stimabile come segue [ETH 2003], [Oberhuber 2014]:

- 1) Stima dello spessore dello strato di ghiaccio secondo

$$h = 0.035 \sqrt{|T_L| t_w} \text{ [m]}, \text{ come minimo } 0,3 \text{ m fino a un'altitudine di } 500 \text{ m s.l.m. e } 0,8 \text{ m a partire da } 2300 \text{ m s.l.m. (estrapolazione lineare tra due).}$$

$|T_L|$ è il valore assoluto della media delle temperature negative durante il periodo freddo considerato (in °C) e t_w la durata corrispondente (in giorni). Le temperature e la durata del periodo freddo rappresentano valori medi pluriennali determinati sulla base dell'analisi dei dati meteorologici di una stazione ubicata nelle vicinanze (ad un'altitudine simile).

- 2) Stima della pressione totale del ghiaccio moltiplicando lo spessore dello strato per una pressione di 200 kN/m².

⁹ Ad esempio, uno strato di sedimenti pari al 25% della profondità dell'acqua provoca, su due dimensioni, un aumento del carico statico orizzontale totale del 2,5%.

¹⁰ Un'analisi sismica semplificata può essere effettuata per i piccoli impianti di classe III secondo i capitoli 7.1 e 7.2 della parte C3 della direttiva. Il fattore di sicurezza statica compreso in questa analisi semplificata si ottiene, analogamente all'equazione del capitolo 4.6.6.1, con la formula $FS = \frac{\tan \varphi \sum N + cA}{\sum T}$ nel caso di carico normale (bacino pieno).



4.4.10. Valanga

Viene fatta distinzione tra l'impatto diretto di una valanga su un impianto realizzato a tale scopo (impianto di protezione contro le valanghe) e un'onda di impulso provocata da una valanga che si riversa nella ritenuta.

Valanga contro un'opera di sbarramento

Se le valanghe possono colpire un'opera di sbarramento, la pressione esercitata su di essa da considerare per le verifiche corrisponde a quella provocata da una valanga con un periodo di ritorno di 300 anni. La pressione q_f va determinata secondo le indicazioni della letteratura specializzata, ad esempio secondo [Salm et al. 1987, Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St.Gallen 1999, Schleiss et Pougatsch 2011] per una valanga di fondo

$$q_f = 0.5c_d\rho_f v_f^2 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

dove v_f = velocità della valanga [m/s], c_d = tra 2 e 3 (coefficiente di resistenza) e ρ_f = 0,3 [t/m³].

In presenza di un rischio d'impatto di oggetti singoli (ad esempio alberi), alla pressione q_f va aggiunta la corrispondente pressione di questi oggetti.

Onda di impulso

Se le valanghe possono riversarsi nella ritenuta, deve essere stimata l'onda di impulso generata da una valanga con un periodo di ritorno di 300 anni e va valutato il rischio di inondazione dell'opera di sbarramento. Se l'onda è in grado di superare il livello di pericolo secondo la parte C2 della direttiva vanno adottate misure costruttive o d'esercizio (ad esempio la costruzione di un parapetto o l'innalzamento permanente o temporaneo del bordo franco).

La procedura secondo [Heller et al. 2009] permette di calcolare l'altezza dell'onda generata al livello dell'opera di sbarramento (come pure la zona d'impatto, il deflusso e la durata dell'onda) e le forze da applicare nei calcoli di struttura.

4.4.11. Colate detritiche

Si applicano le medesime considerazioni fatte per le valanghe, cfr. [Salm et al. 1987, Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St.Gallen 1999, Heller et al. 2009, Rickenmann 1995, 1999, 2008, 2016, Bergmeister et al. 2009, Schleiss et Pougatsch 2011]. La pressione può essere determinata in base a

$$q_f = 0.5c_d\rho_f v_f^2 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

dove v_f = velocità della colata detritica [m/s], c_d = tra 1,5 e 2,0 (coefficiente di resistenza) e ρ_f = 1,8 [t/m³].



4.5. Altre azioni individuali

4.5.1. Ancoraggi

Gli ancoraggi (tiranti pretensionati e passivi) costituiscono un elemento integrativo di rinforzo della stabilità nel caso in cui non siano soddisfatti gli usuali criteri di sicurezza. La loro azione va considerata in base alla norma SIA 267 vigente [SIA 2013a, 2013b].

Gli ancoraggi nuovi (principalmente gli ancoraggi pretensionati) devono essere concepiti e installati in modo da poterne misurare la forza e controllarne lo stato.

Per le opere di sbarramento nuove, il coefficiente di sicurezza senza ancoraggio (opera di sbarramento e zona d'appoggio) non deve essere inferiore a 1,0 per le combinazioni di azioni del tipo normale.

L'utilizzo degli ancoraggi per la stabilizzazione dei versanti è ammesso secondo la pratica usuale nella meccanica dei suoli e delle rocce. Particolare attenzione va prestata agli aspetti dello scorrimento viscoso e del rilassamento [SIA 2013a].

4.5.2. Carichi rotabili

Generalmente i carichi rotabili non sono determinanti nell'analisi delle tensioni delle opere di sbarramento e possono essere trascurati. Nel caso contrario, quelli provenienti dal traffico stradale possono essere ripresi dalla norma SIA 261 [SIA 2014] e introdotti, a seconda dei casi, come carico normale o straordinario (cfr. capitolo 4.3).

4.5.3. Impatto da imbarcazioni

Le situazioni accidentali dovute all'impatto da imbarcazioni possono avere un ruolo in presenza di traverse mobili con chiuse. Se del caso, vanno considerate come carico straordinario (cfr. capitolo 4.3).

4.5.4. Rigonfiamento di origine chimica del calcestruzzo

In caso di presenza di un rigonfiamento di origine chimica del calcestruzzo di una diga esistente (in particolare legato a una reazione alcali-aggregati), le tensioni interne ad esso associate dovute a una sovradeterminazione del sistema statico (dighe ad arco), così come l'eventuale danneggiamento del calcestruzzo (stadio avanzato della reazione), vanno valutati di caso in caso, come pure l'impatto sulla sicurezza.



4.5.5. Scorrimento viscoso, ritiro, rilassamento e assestamento

Gli effetti differiti come lo scorrimento viscoso, il ritiro e il rilassamento del calcestruzzo si sviluppano gradualmente nel tempo, provocando una modifica delle proprietà del materiale. Questi effetti vanno considerati se sono in grado di influenzare lo stato delle tensioni dell'opera di sbarramento, sia in modo esplicito (legge di comportamento) che implicito (modifica globale del modulo di elasticità del calcestruzzo, della roccia, del materiale sciolto ecc.).

Al fine di garantire un bordo franco sufficiente per le dighe in materiale sciolto, nella fase di progettazione bisogna tener conto dell'assestamento lungo la cima.

4.5.6. Caduta di un aeromobile su un'opera di sbarramento

Non è richiesta alcuna verifica per questo tipo di sollecitazione in quanto rientra nel rischio residuo.

4.5.7. Sovrastrutture

Le sovrastrutture quali i piloni dei sistemi di comunicazione generalmente non hanno rilevanza sulle opere ausiliarie di sicurezza e non sono soggette alle condizioni della presente direttiva. Tuttavia occorre vigilare affinché non creino instabilità locali a livello delle loro fondazioni.

4.6. Criteri di integrità strutturale

4.6.1. Principi di base

Nel determinare i criteri di verifica dell'integrità strutturale occorre considerare lo stato ultimo per il quale la verifica viene effettuata e il tipo di combinazione di azioni secondo il capitolo 4.3. Nel quadro delle verifiche, devono essere effettuati dei calcoli di sensibilità riguardanti nello specifico le caratteristiche geotecniche e le sottopressioni, al fine di evidenziare i parametri preponderanti e di meglio circoscrivere la performance effettiva dell'impianto in questione in funzione del livello di conoscenza di questi parametri.

Le verifiche vanno effettuate secondo il concetto dei coefficienti parziali di sicurezza per sollecitazione e resistenza, nella maniera seguente:

- **sollecitazioni:** la loro stima il più possibile esatta («best estimate») o i loro valori medi se sono determinate sulla base di un'analisi statistica oppure i loro valori mediani se sono determinate sulla base di diversi modelli di stima possibili. Non va introdotto nessun coefficiente parziale di carico;
- **resistenza:** diminuzione della resistenza caratteristica con i coefficienti parziali del capitolo 4.6.5.



4.6.2. Classi d'impianti di accumulazione

Al fine di verificarne l'integrità strutturale sotto sollecitazioni statiche, i diversi impianti di accumulazione sono suddivisi in tre classi assoggettate a criteri diversi in merito all'entità delle verifiche e alle indagini da effettuare. La classificazione è identica a quella utilizzata per la verifica della sicurezza sismica, cfr. parte C3 della direttiva.

La suddivisione in classi si basa sui seguenti criteri:

- gli impianti di accumulazione di **classe I** soddisfano i criteri dell'art. 18 cpv. 1 lett. a o lett. b OImA;
- gli impianti di accumulazione di **classe II** hanno un'altezza d'invaso pari a o superiore a 5 m, soddisfano il criterio geometrico di cui all'art. 3 cpv. 2 LImA e non sono assegnati alla classe I;
- gli impianti di accumulazione dei **classe III** non soddisfano il criterio geometrico di cui all'art. 3 cpv. 2 LImA o hanno un'altezza d'invaso fino a 5 m.

Le classi d'impianti di accumulazione sono rappresentate in forma grafica nell'**Allegato 4** secondo l'altezza d'invaso e il volume della ritenuta, conformemente alle corrispondenti definizioni della parte A della direttiva.

Gli impianti di accumulazione per la protezione contro i pericoli naturali e che servono alla ritenuta di acqua solo eccezionalmente sono assegnati alla classe III, indipendentemente dall'altezza d'invaso e dal volume della ritenuta.

Gli argini laterali delle traverse mobili sono assegnati alla classe III, fatti salvi diversi e più severi requisiti posti dall'autorità di vigilanza, dalle autorità concessionarie o da autorità terze.



4.6.3. Determinazione delle caratteristiche dei materiali

In generale i parametri dei materiali necessari vanno determinati attraverso delle prove rappresentative in laboratorio e sul terreno. Il frattile del 5% va considerato per i valori di resistenza¹¹. I risultati delle prove svolte in fase di costruzione possono essere utilizzate per gli impianti esistenti. Date le incertezze associate alla determinazione delle caratteristiche dei materiali si raccomanda in ogni caso prudenza nella scelta dei parametri.

I parametri dei materiali possono essere calcolati anche a partire da analisi delle misurazioni del comportamento dell'impianto, se è dimostrabile che il calcolo inverso (retroanalisi) è adatto a determinare i parametri necessari.

La resistenza del calcestruzzo alla compressione statica uniassiale f_{cs} (determinazione mediante prova su cilindro le cui dimensioni vanno stabilite in funzione della granulometria del calcestruzzo) e alla trazione statica f_{ts} (determinazione mediante prova brasiliana su cilindro le cui dimensioni vanno anch'esse stabilite in funzione della granulometria del calcestruzzo) sono determinate per un'età rappresentativa del calcestruzzo a partire dalla comparsa dell'azione reale o ipotetica per la quale viene effettuata la verifica, oppure in maniera conservativa.

Per gli impianti di accumulazione di **classe I e II**, la resistenza alla trazione del calcestruzzo va determinata sulla base delle prove alla trazione. In assenza di queste prove, nelle analisi e nelle verifiche si introduce una resistenza nulla.

Per gli impianti di accumulazione di **classe III**, la resistenza alla trazione statica del calcestruzzo f_{ts} (in MPa) può essere valutata in funzione della resistenza alla compressione statica f_{cs} (in MPa) sulla base della relazione [Arioglu et al. 2006]:

$$f_{ts} = 3 / 8 \cdot f_{cs}^{2/3}, \text{ al massimo } 3 \text{ MPa}$$

Per gli impianti di accumulazione esistenti di **classe III**, i parametri dei materiali possono essere ricavati dalla letteratura oppure dai dati di costruzione comparabili. Se sono stimati in questo modo, i valori di resistenza devono essere ridotti del fattore 1,2 (compreso angolo di attrito) e la coesione deve essere ridotta del fattore 2,0. A questa riduzione vanno aggiunti i coefficienti parziali di resistenza secondo il capitolo 4.6.5.

¹¹ In caso di analisi non lineari a elementi finiti, è possibile introdurre nei modelli un valore medio di resistenza (legge di comportamento).



4.6.4. Elementi di modellizzazione

Per i casi di carichi statici, si applicano i requisiti minimi di modellizzazione secondo la tabella 4-4:

Tema	Classe d'impianti di accumulazione		
	I	II	III
Determinazione delle pressioni interstiziali (materiale sciolto)	Modello 2D agli elementi finiti o alle differenze finite	Modello 2D agli elementi finiti o alle differenze finite	Modello 2D, empirico
Determinazione della temperatura interna (dighe ad arco)	Modello 2D agli elementi finiti o alle differenze finite	Modello 2D agli elementi finiti o alle differenze finite	Modello 2D, empirico
Verificazione della stabilità d'insieme, impianti con comportamento fondamentalmente bidimensionale	Modello 2D	Modello 2D	Modello 2D
Verificazione della stabilità d'insieme, altri impianti	Modello 3D agli elementi finiti	Modello 3D agli elementi finiti	Modello 2D, per ogni blocco
Verificazione della stabilità interna, impianti con comportamento fondamentalmente bidimensionale	Modello 2D agli elementi finiti dell'opera di ritenuta e della fondazione	Modello 2D agli elementi finiti dell'opera di ritenuta, modellizzazione sommaria della fondazione	Modellizzazione a trave semplice (dighe a gravità) o o analisi della stabilità allo scorrimento (dighe in materiale sciolto); modellizzazione sommaria della fondazione
Verificazione della stabilità interna, altri impianti	Modello 3D agli elementi finiti dell'opera di ritenuta e della fondazione	Modello 3D agli elementi finiti dell'opera di ritenuta, modellizzazione sommaria della fondazione	Modellizzazione a travi incrociate senza torsione (dighe ad arco) o analisi della stabilità allo scorrimento (dighe in materiale sciolto); modellizzazione sommaria della fondazione

Tabella 4-4: Esigenze minime di modellizzazione



In caso di modellizzazione tridimensionale agli elementi finiti dell'area della fondazione, quest'ultima deve presentare le seguenti dimensioni minime in funzione della rigidità del calcestruzzo dello sbarramento e del suolo di fondazione [Fok K-L, Chopra A. K. 1985]:

$$R_f > 1,0 \cdot H \text{ per } E_s / E_b = 1,0$$
$$R_f > 1,5 \cdot H \text{ per } E_s / E_b = 0,5$$
$$R_f > 2,0 \cdot H \text{ per } E_s / E_b = 0,25$$

E_b : modulo di elasticità del calcestruzzo

E_s : modulo di elasticità della fondazione

H : altezza dell'opera

R_f : dimensioni spaziali del modello della fondazione

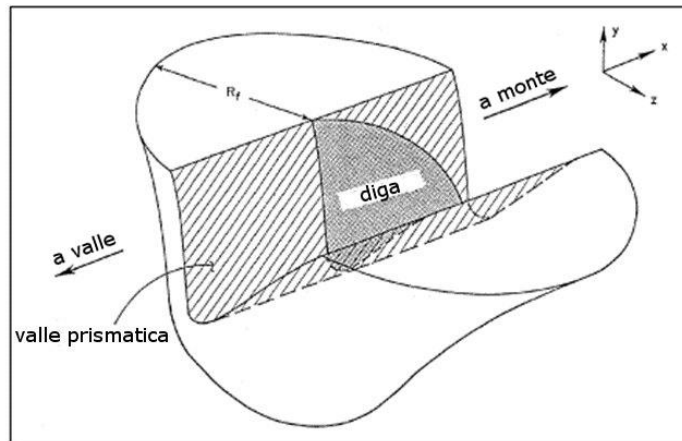


Figura 4-1: Delimitazione del modello di fondazione in 3D [Fok et Chopra, 1985]



4.6.5. Coefficienti parziali di resistenza

Si applicano i coefficienti parziali delle tabelle 4-5 e 4-6. Vanno introdotti come indicato nei capitoli seguenti.

Tipo di combinazione	Stabilità d'insieme (dighe in calcestruzzo e dighe in materiale sciolto)		
	Scorrimento		Sollevamento **)
	Coesione	Angolo di attrito	
	γ_{mc}	$\gamma_{m\phi}$	γ_{sf}
Normale	3,0	1,5	1,15
Straordinaria	2,0	1,3	1,05
Estrema statica*)	1,1	1,1	1,00

*) Una combinazione del tipo «estrema dinamica» deve soddisfare i requisiti atti a prevenire una fuoriuscita incontrollata di masse d'acqua secondo la parte C3 della direttiva.

**) A breve termine, dopo una sollecitazione sismica e fino all'attuazione di eventuali misure (v. parte C3, § 7.3 paragrafo 2), il coefficiente parziale in caso di sollevamento deve essere pari o superiore a 1,0.

Tabella 4-5: Coefficienti parziali di resistenza per la stabilità d'insieme (§ 4.6.6.)

Tipo di combinazione	Stabilità delle dighe in materiale sciolto, scorrimento		Stabilità delle dighe in calcestruzzo, tensioni	
	γ_{mc}	$\gamma_{m\phi}$	γ_{sc} *)	γ_{st} *)
Normale	3,0	1,5	3,0	2,0
Straordinaria	2,0	1,3	2,0	1,5
Estrema statica **)	1,1	1,1	1,1	1,1

*) γ_{st} , resistenza alla trazione (brasiliiana) e γ_{sc} , resistenza alla compressione su cilindro le cui dimensioni vanno determinate in funzione della granulometria del calcestruzzo [ad esempio Schleiss e Pougatsch, 2011].

**) Una combinazione del tipo «estrema dinamica» deve soddisfare i requisiti atti a prevenire una fuoriuscita incontrollata di masse d'acqua secondo la parte C3 della direttiva.

Nota :

- In generale, non va considerato alcun aumento della resistenza per il caso di uno stato di compressione biassiale.
- La resistenza alla trazione è generalmente nulla all'interfaccia calcestruzzo-roccia e pari circa al 55% della resistenza del calcestruzzo nei giunti verticali e orizzontali. Se le riprese di getto non vengono preparate con cura, la resistenza alla trazione nelle riprese di getto da considerare nelle analisi e nelle verifiche è pari a circa il 40% di quella del calcestruzzo [Oberhuber, P. 2014] e [ICOLD-EC, 2004a].

Tabella 4-6: Coefficienti parziali di resistenza per la resistenza ultima (§ 4.6.7)



4.6.6. Stabilità d'insieme

4.6.6.1. Stabilità allo scorrimento

La stabilità allo scorrimento va verificata in relazione alla superficie critica potenziale più sfavorevole, tenendo conto della struttura geologica delle fondazioni e dell'inclinazione delle interfacce. La stabilità allo scorrimento è soddisfatta se:

$$\sum T \leq \left[(tg \varphi \sum N) / \gamma_{m\phi} \right] + \left[(cA) / \gamma_{mc} \right]$$

dove:

$\sum N$	= somma delle forze normali alla superficie di scorrimento ¹²	A	= area della fondazione
$\sum T$	= somma delle forze tangenziali alla superficie di scorrimento	φ	= angolo di attrito interno (valore residuo)
γ_{mc}	= coefficiente parziale di resistenza per la coesione	c	= coesione (valore residuo)
$\gamma_{m\phi}$	= coefficiente parziale di resistenza per l'angolo di attrito		

La coesione non può essere considerata, a meno che sia effettivamente mobilizzabile. Per tenere conto delle incertezze e del rischio di una diminuzione o di una scomparsa della coesione dovuta a un movimento, deve essere applicato il valore residuo della coesione. I valori di φ e c devono inoltre tenere conto dello stato della superficie di scorrimento.

Se vi è incertezza circa la possibile mobilizzazione della coesione o il relativo valore, nelle verifiche dev'essere applicata una coesione nulla.

Queste considerazioni si applicano anche alla verifica della stabilità allo scorrimento nel corpo delle dighe in muratura o in calcestruzzo, ad esempio lungo le riprese di getto.

¹² Compresa la deduzione dovuta alla sottopressione



4.6.6.2. Stabilità al ribaltamento

Bisogna verificare che per le combinazioni di azioni di tipo normale lungo l'interfaccia calcestruzzo-roccia non si generi alcuna trazione ribaltamento e che per le combinazioni di azioni di tipo straordinario ed estremo statico eventuali trazioni siano limitate, secondo i seguenti criteri:

Combinazioni di tipo normale
(tipo 1):

la risultante delle forze è compresa nel **terzo centrale** della sezione (compresa riduzione dovuta alle sottopressioni);

Combinazioni di tipo straordinario
(tipo 2):

la risultante delle forze è compresa nei **due terzi centrali** (un terzo della sezione ripartito da una parte e dall'altra dal centro) della sezione (compresa riduzione dovuta alle sottopressioni);

Combinazioni di tipo estremo statico
(tipo 3):

risultato delle forze agenti **nella sezione** (compresa riduzione dovuta alle sottopressioni).

Se questo criterio non è soddisfatto, va effettuata un'analisi dettagliata della stabilità tenendo conto dell'apertura dell'area di contatto e vanno adottate adeguate misure costruttive, ad esempio volte a impedire la penetrazione di acqua nell'interfaccia per le combinazioni di azioni di tipo normale.

L'area non fessurata deve essere in grado di riprendere le forze all'interfaccia, con i coefficienti parziali secondo la Tabella 4-5.

4.6.6.3. Stabilità al sollevamento

La stabilità al sollevamento è definita dal rapporto tra la somma delle forze verticali verso il basso V_b e la somma delle forze verticali verso l'alto V_h ed è verificata se

$$V_h \leq V_b / \gamma_{sf}$$

La stabilità al sollevamento (ad esempio un sollevamento idraulico attraverso l'annullamento delle tensioni effettive) dev'essere verificata in caso di sbarramenti «leggeri», quali traverse mobili e dighe in materiale sciolto, in presenza di strati geologici poco o non permeabili a valle dello sbarramento.



4.6.7. Resistenza ultima dell'opera di sbarramento

4.6.7.1. Dighe in materiale sciolto

La verifica è volta ad assicurare che la stabilità dell'impianto sia mantenuta per ognuna delle combinazioni di azioni considerate, con un margine di sicurezza contro l'insorgere di eventuali danni secondi i coefficienti parziali di resistenza (Tabella 4-6).

Va svolta una verifica concernente il rischio di erosione interna. Deve essere verificata la presenza di radici in decomposizione oppure di nidi o tane di roditori che formano vie d'infiltrazione preferenziali, di un danneggiamento degli elementi di tenuta o di drenaggio, di danni al filtro ecc. Lo stesso vale per quanto concerne i fenomeni di scalzamento, ad esempio per le dighe in materiale sciolto il cui piede a valle si trova nelle immediate vicinanze di un corso d'acqua che potrebbe tracimare e dunque danneggiare il piede oppure per i casi di dighe tracimabili.

4.6.7.2. Dighe in calcestruzzo

La verifica è volta ad assicurare che per ognuna delle combinazioni di azioni considerate e con un margine di sicurezza secondo i coefficienti parziali di resistenza (Tabella 4-6) non si produca alcun danno al calcestruzzo (fessurazione) in grado di generare un'instabilità locale o globale.

Nel caso in cui le tensioni superino le resistenze ammissibili, occorre dimostrare la possibilità di una redistribuzione delle stesse. Se tale dimostrazione viene effettuata sulla base di un calcolo della stabilità parziale (ad esempio di un blocco), devono essere soddisfatti i coefficienti parziali di resistenza secondo la Tabella 4-5 («stabilità d'insieme»).

Nel caso di possibile fessurazione, bisogna inoltre assicurarsi che dall'impianto non possa fuoriuscire una massa d'acqua in maniera incontrollata, né che possa prodursi un'erosione dell'impianto dovuta ad abrasione.

4.6.7.3. Traverse mobili

Le traverse mobili sono trattate analogamente alle dighe in calcestruzzo.



4.6.8. Area della fondazione

La verifica della resistenza ultima dell'area di fondazione include:

- **capacità portante:** verifica dello stato delle tensioni dell'area della fondazione secondo le usuali regole della geotecnica, in particolare nel contatto fondazione-roccia, tenendo conto dei coefficienti parziali secondo la Tabella 4-6;
- **scorrimento o rottura:** secondo le usuali regole della geotecnica e della meccanica delle rocce, tenendo conto dei coefficienti di resistenza secondo la Tabella 4-5 (applicabile alle superfici di scorrimento e ai cunei di roccia);
- **fosse di erosione:** in particolare a valle delle traverse mobili, legate alla modalità d'esercizio dell'impianto. Se è minacciata la stabilità dell'impianto vanno adottate misure adeguate (d'esercizio e/o costruttive);
- **erosione:** in particolare in presenza di infiltrazioni, danneggiamento della parete diaframma e crepe.

4.6.9. Stabilità dei versanti dell'area della ritenuta

La verifica è finalizzata ad assicurare che non si produca alcun scorrimento, distacco o instabilità in grado di provocare un'onda di impulso che possa danneggiare o sommergere l'impianto oppure danneggiare direttamente l'opera di sbarramento o le relative opere ausiliarie di sicurezza (compresi gli sfioratori), tenendo conto dei coefficienti parziali di resistenza secondo la Tabella 4-5. Particolare attenzione va prestata in caso di carico «abbassamento rapido».

Qualora non sia possibile fornire tale dimostrazione, devono essere valutate le eventuali conseguenze di un'instabilità e di una susseguente onda di impulso. In funzione di queste conseguenze, vanno adottate le necessarie disposizioni costruttive (ad esempio drenaggio dell'area, posa di ancoraggi o di chiodi ecc.), di sorveglianza (volte a individuare un pericolo imminente) o d'esercizio (aumento del bordo franco).



5. Considerazioni costruttive particolari

5.1. Vegetazione sulle dighe in materiale sciolto

Le scarpate e il coronamento di dighe in materiale sciolto **nuove** devono rimanere liberi da qualsiasi tipo di vegetazione (alberi, arbusti e cespugli fitti) che potrebbe

- danneggiare gli elementi di tenuta attraverso la propagazione di radici;
- ostruire i sistemi di drenaggio;
- impedire il controllo visivo delle scarpate (messa in evidenza di cedimenti, instabilità, crepe, fuoriuscite d'acqua);
- attirare dei roditori che possono scavare buchi e cunicoli, danneggiando gli elementi di tenuta, o creare vie d'infiltrazione interne preferenziali;
- provocare danni importanti alle scarpate in caso di estirpazione (ad esempio a causa di alberi abbattuti da venti violenti).

È ammessa la presenza di vegetazione solamente se si tratta di piante con radici corte e disposte in modo diradato, e finché sia presente un sovraprofilo della diga in materiale sciolto (assenza di radici nel profilo statico).

Per gli **impianti esistenti** e gli **argini laterali** delle traverse mobili, si applicano in linea di principio i medesimi requisiti degli impianti nuovi. D'intesa con l'autorità di vigilanza, è tuttavia ammessa una certa flessibilità in merito all'applicazione, in particolare all'esterno del profilo statico richiesto.

Secondo la legislazione sulle foreste (legge federale del 4 ottobre 1991 sulle foreste, RS 921.0 e ordinanza del 30 novembre 1992 sulle foreste, RS 921.01), gli arbusti e gli alberi situati su una diga e nella zona immediatamente antistante il piede a valle di una diga (in generale entro una striscia larga 10 metri) non sono considerati foreste e non sono assoggettati alle disposizioni di questa legislazione.

5.2. Costruzioni sulle dighe in materiale sciolto

Le scarpate, il coronamento e il terreno immediatamente antistante le dighe in materiale sciolto (striscia di circa 10 metri) devono rimanere liberi da qualsiasi costruzione che possa compromettere la buona esecuzione dei controlli visivi necessari e delle misure (in particolare le misure geodetiche).



6. Protezione dagli atti di sabotaggio (art. 6 cpv. 7 LImA)

Si tratta di prevenire gli atti di sabotaggio ai danni degli impianti di accumulazione la cui zona contigua inondabile è esposta a un pericolo elevato (art. 11 cpv. 2 LImA, art. 26 cpv. 2 OlmA). Ciò riguarda tutti gli impianti di accumulazione muniti di un sistema d'allarme acqua (cfr. parte E della direttiva). L'autorità di vigilanza può ordinare, se necessario, l'estensione delle misure anche ad altri impianti nonché l'adozione di ulteriori misure, ad esempio in base all'analisi dei pericoli svolta nel quadro della redazione del regolamento in caso di emergenza. Essa può inoltre non esigere l'attuazione delle misure citate se queste contribuiscono solo marginalmente alla prevenzione degli atti di sabotaggio oppure se sono previste altre misure equivalenti.

- Accesso all'interno di un'opera di sbarramento:
 - o le porte d'accesso all'interno delle opere di sbarramento devono avere la classe di resistenza RC 4 secondo EN 1627:2011;
 - o in linea di principio, solo le persone autorizzate possono accedere all'interno dell'opera di sbarramento. La strumentazione di misurazione collocata lungo il percorso del sopralluogo deve essere protetta dalle manipolazioni inopportune;
- Accesso ai comandi degli sfioratori e dei dispositivi di scarico:
 - o l'accesso al quadro dei comandi degli sfioratori e dei dispositivi di scarico è riservato al personale autorizzato. Gli accessi ai comandi che non si trovano all'interno dell'opera di sbarramento o di un edificio con classe di resistenza RC 4 secondo EN 1627:2011 devono soddisfare questo requisito;
- Accesso alle paratoie
 - o Nei casi di facile accesso da valle alle paratoie dei dispositivi di scarico, l'accesso va sorvegliato (ad esempio rilevatore di presenza e videocamera). Per evitare allarmi inopportuni è possibile installare una rete di protezione o una griglia leggera che impediscano agli animali di entrare nella galleria di scarico senza limitare il deflusso.

7. Smantellamento di un impianto

Dal punto di vista della procedura lo smantellamento di un impianto di accumulazione è assimilato a una modifica d'impianto. Se dopo lo smantellamento non sono più soddisfatti i criteri d'assoggettamento secondo l'art. 2 LImA, il gestore può domandare all'autorità di vigilanza di constatare tale situazione; in questo caso l'impianto non è più assoggettato alle disposizioni della LImA.

Una rimessa in esercizio dell'impianto di accumulazione dopo il suo smantellamento corrisponde a una costruzione e alla messa in esercizio di un nuovo impianto con le autorizzazioni preliminari che ciò comporta.

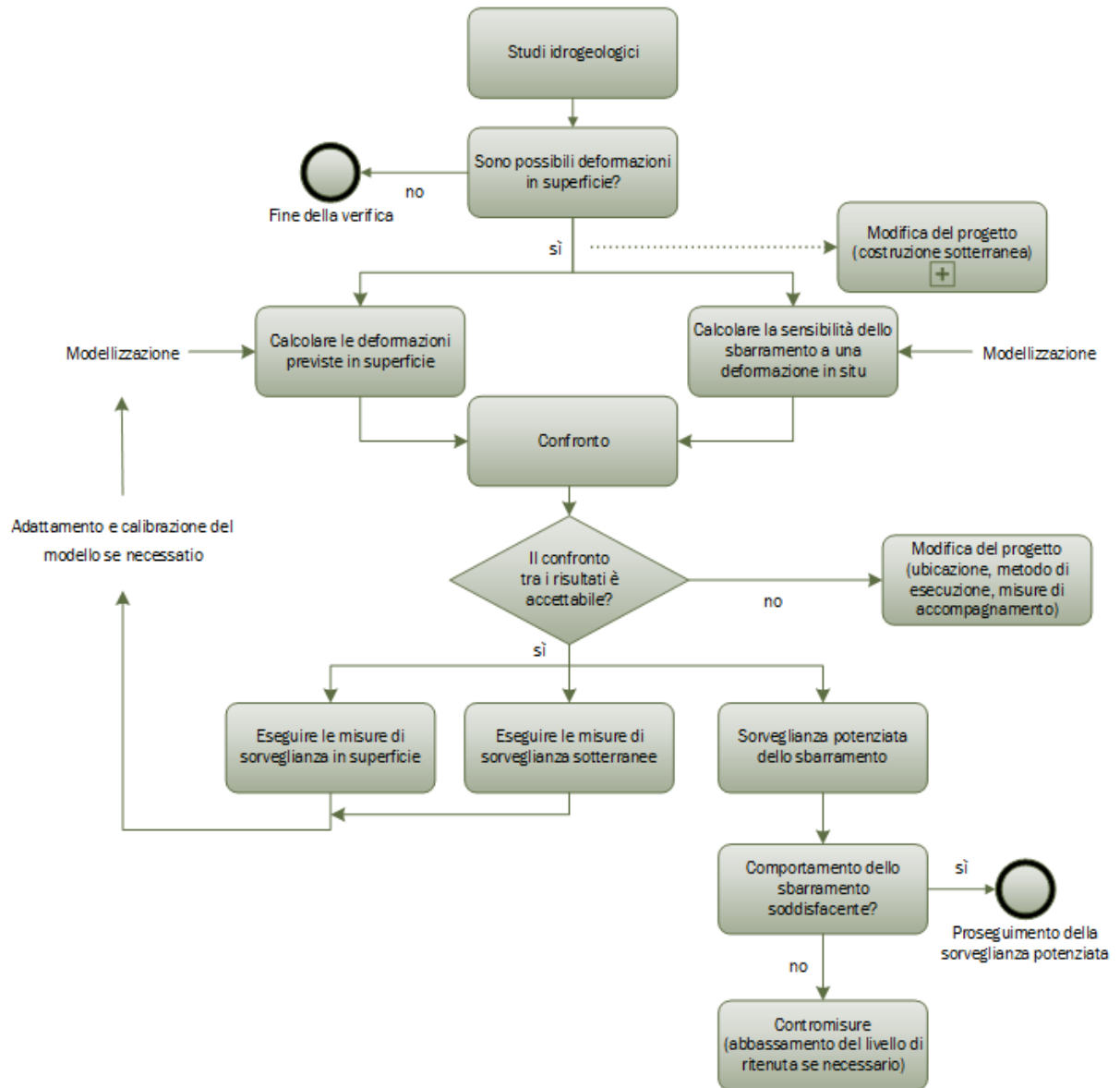


8. Bibliografia

- Arioglu, N., Canan Girin, Z., Arioglu, E. (2006). Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application in strength criterion. *ACI Materials Journal* 103(1), 18-24.
- Bergmeister, K., Suda, J., Hübl, J. & Miklau-Rudolf, F., 2009: *Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren, Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele*. Ernst und Sohn.
- ETH Zürich, 2003. *Einführung in die Physik aquatischer Systeme*, Professur für Umweltphysik, note del corso semestre 2003/2004.
- Fok K-L, Chopra A. K *Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams*, Earthquake Engineering research Center, Report N° UCB/EERC-85/07, pagg. 20-33, luglio 1985.
- Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St.Gallen, 1999: *Richtlinie Objektschutz gegen Naturgefahren*.
- Heller Valentin, Hager Willi H., Minor Hans-Erwin, 2009: *Landslide generated impulse waves in reservoirs, Basics and computation*, VAW_4257 EN, 27 febbraio 2009.
- ICOLD-EC, 2004: *ICOLD European Club, Working Group on Sliding Safety of Existing Gravity Dams, Final Report*, 2004.
- Kupfer H. B., Gerstle K. H. *Behaviour of Concrete under biaxial Stresses*, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, pagg. 853-866, agosto 1973.
- Obernhuber, Pius, 2014: *Internationale Übersicht über die Anforderungen an die Gleit- und Kippsicherheitsnachweise von Gewichtsmauern*, UFE, aprile 2014.
- Rickenmann, D., 1995: *Beurteilung von Murgängen*. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, n. 48, pagg. 1104-1108.
- Rickenmann, D., 1999: *Empirical relationships for debris flows*. *Natural Hazards*, 19(1), 47-77.
- Rickenmann, D., 2008: *Lastfälle aus Murgangprozessen – Bemessungsgrundlagen*. *Herbstkurs der Fachleute für Naturgefahren (FAN)*, Bellinzona, Svizzera, 17 settembre 2008.
- Rickenmann, D. 2016: *Methods for the quantitative assessment of channel processes in torrents (steep streams)*. *IAHR Monograph Series*, CRC Press/Balkema, ISBN: 978-1-138-02961-3 (Hbk), ISBN: 978-1-4987-7662-2 (eBook PDF).
- Salm, B., Zarn, B., Bigger, V., 1987: *Schnee, Lawinen und Lawinenschutz; Vorlesung*, ETHZ.
- Schleiss Anton J., Pougatsch Henri, 2011: *Les Barrages – Du projet à la mise en service*, *Traité de génie civil de l'École polytechnique fédérale de Lausanne*, Presses polytechniques et universitaires romandes, vol. 17.
- SIA, 2013a: *Norma 267, Geotecnica*.
- SIA, 2013b: *Norma 267/1, Geotecnica – Specifiche complementari*.
- SIA 2014: *Norma 261, Azioni sulle strutture portanti*.
- US Army Corps of Engineers, 2000: *Evaluation and Comparison of Stability Analysis and Uplift Criteria for Concrete Gravity Dams by Three Federal Agencies*, ERDC/ITL TR-00-1 gennaio 2000.



Allegato 1 Procedura volta a prevenire la compromissione della sicurezza di un impianto di accumulazione in caso di costruzione sotterranea nelle vicinanze



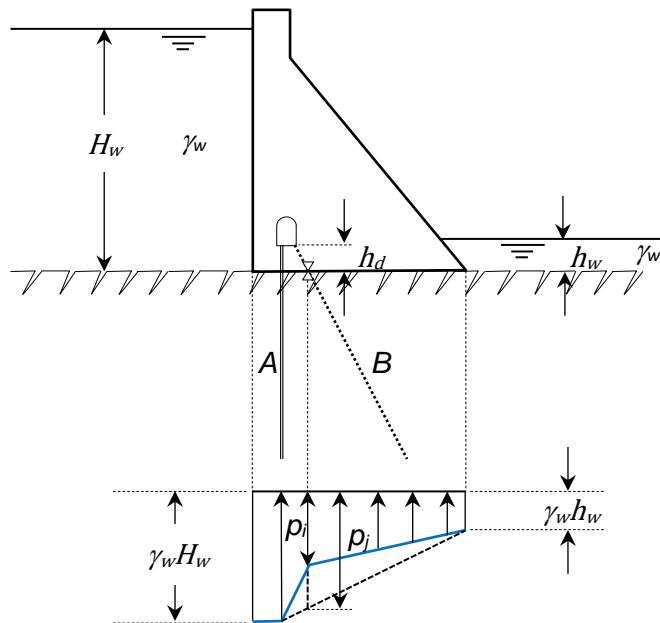


Allegato 2 Requisiti («condizioni») tipici da soddisfare prima, durante o al termine dei lavori

Requisiti (selezione)
Prima dell'esecuzione dei lavori
Notifica scritta di inizio lavori
Conferma mediante prelievi delle caratteristiche dei materiali ammessi al momento delle verifiche
Durante l'esecuzione dei lavori (si veda anche l'art. 6 cpv. 2 OlmA)
Pianificazione aggiornata dei lavori e stato d'avanzamento dei lavori
Accompagnamento dei lavori di costruzione e delle iniezioni da parte di un professionista (ad esempio geologo o geotecnico)
Eventuali limitazioni d'esercizio (in caso di modifica di un impianto esistente)
Installazione di un sistema d'allarme acqua
Comunicazione dei risultati dei controlli dell'esecuzione e dei prelievi del materiale
Comunicazione dei risultati dei lavori d'iniezione
Notifica di eventi particolari
Notifica scritta di fine lavori
Al termine dei lavori (si veda anche l'art. 6 cpv. 3 e l'art. 9 OlmA)
Consegna di un rapporto finale di costruzione, inclusa la documentazione fotografica dei lavori
Consegna dell'interpretazione dei risultati dei controlli dell'esecuzione e dei prelievi di materiale
Consegna dei piani dell'opera realizzata
Consegna dei rilievi geologici e della loro interpretazione
Consegna dell'interpretazione dei risultati dei controlli effettuati durante i lavori
In caso di lavori agli sfioratori e ai dispositivi di scarico: prove di funzionamento (prova con scarico d'acqua)
Requisiti specifici alla modifica di un impianto
Misurazione di riferimento prima dell'inizio dei lavori (inclusa geodesia completa)
Protezione del sistema di misurazione esistente durante i lavori (in particolare del sistema di misura geodetico)
Proseguimento del programma di misurazioni, eventualmente in modo rafforzato; comunicazione dei risultati (a chi, con quale frequenza)



Allegato 3 Forme convenzionali dei diagrammi delle sottopressioni



Legenda

- A schermo d'iniezioni
- B schermo di drenaggio
- \times punto di misurazione all'interfaccia
- p_j pressione senza l'effetto di drenaggio sull'interfaccia
- p_i pressione con l'effetto di drenaggio sull'interfaccia : $p_i = p_j - k(p_j - p_m)$, con
 p_m il valore di pressione maggiore tra $\gamma_w h_w$ e $\gamma_w h_d$ (secondo la quota della galleria)
- k coefficiente di riduzione / abbassamento (schermo di drenaggio)

Note :

- i) Bisogna assicurarsi che la distanza dei fori di drenaggio e dello schermo d'iniezioni sia adeguata per raggiungere gli obiettivi mediante prove sul posto.
- ii) I diagrammi sopraindicati non si applicano alle dighe a contrafforti o a gravità alleggerita (casi specifici).



Allegato 4 Definizione delle tre classi d'impianti di accumulazione

