

L'ACQUA





Morena Colli^{*(a)}, Andy De Paola^{*(b)}, Giorgia Faggiani^{*(c)}, Mirko Mura^(b), Egon Paganone^(a),
Francesca Pianigiani^(d), Cristina Telaro^(e)

1. CALCOLO IDRAULICO

Sono descritte le forze statiche e dinamiche che agiscono sulle paratoie e sulle valvole. Tra le dinamiche rientrano le forze di **downpull** sulle paratoie verticali. Questi sforzi idrodinamici possono venire trascurati nel caso di paratoie con bassi battenti, ma diventano importanti per paratoie con alti carichi.

In questo paragrafo si riportano indicazioni sulle modalità di calcolo delle portate transitive.

Vengono anche citati i problemi legati all'aria che si accompagna talvolta al flusso idrico sotto o sopra le paratoie che, se non correttamente valutati, possono essere causa di dannose **vibrazioni**. Tra questi si considerano la **cavitazione** e l'erosione che possono prodursi allorché le velocità del flusso idrico raggiungono valori elevati.

1.1 Carichi idrostatici e idrodinamici

Carichi idrostatici

La spinta idrostatica S su di una superficie, comunque inclinata, è una forza diretta normalmente alla superficie stessa. Nel caso di una superficie rettangolare con lato orizzontale L , indicando con α l'angolo formato dalla superficie con l'orizzontale e con h_1 e h_2 gli affondamenti dei lati orizzontali sotto il piano dei carichi idrostatici, il valore della spinta è il seguente:

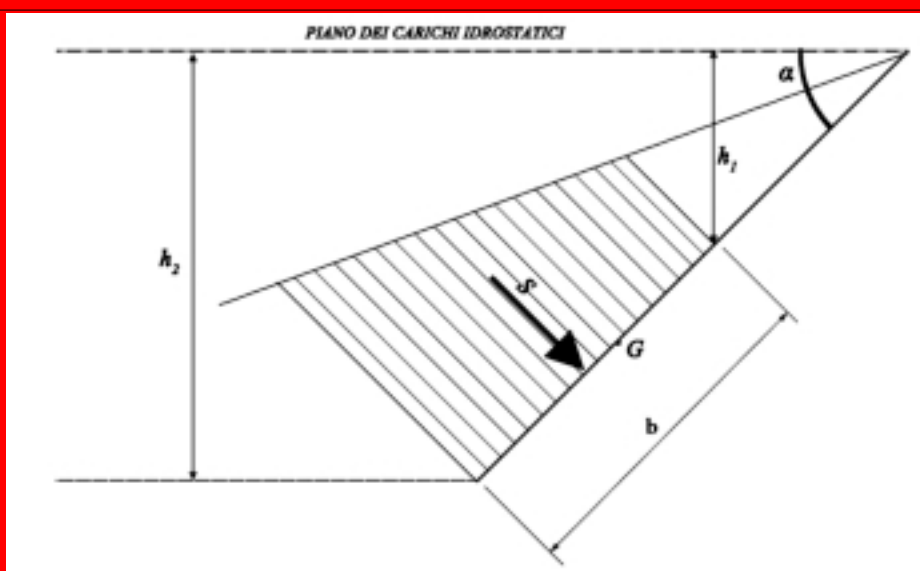


Figura 1 - Schema per il caso comune di superficie rettangolare inclinata (Citrini Nosedà, 1987).

$$S = \frac{\gamma L}{2 \sin \alpha} (h_2^2 - h_1^2)$$

Con l'angolo α tendente a 90° si giunge al caso specifico di superficie piana verticale che corrisponde alla normale condizione delle paratoie piane.

*Coordinatori; ^(a)CVA S.p.A.; ^(b)Geotecnica Progetti s.r.l.; ^(c)Ricerca sul Sistema Energetico, RSE S.p.A.; ^(d)Direzione Generale Dighe del MIT; ^(e)ATB Riva Calzoni.



Nel caso di una paratoia radiale, la risultante della spinta idrostatica agente passa generalmente attraverso il centro di curvatura della paratoia stessa che coincide con il suo asse di rotazione. Per facilitare l'apertura della paratoia il centro delle pressioni può trovarsi anche in una posizione più elevata di quella dell'asse di rotazione. La spinta idrostatica ha direzione normale alla superficie della paratoia e quindi è inclinata rispetto all'orizzontale di un angolo variabile a seconda della configurazione geometrica.

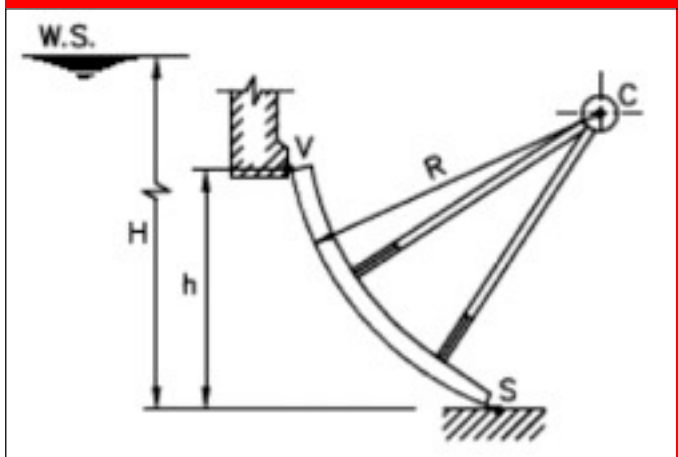


Figura 2 - Schema di paratoia radiale o a settore (Erbisti et al., 2014).

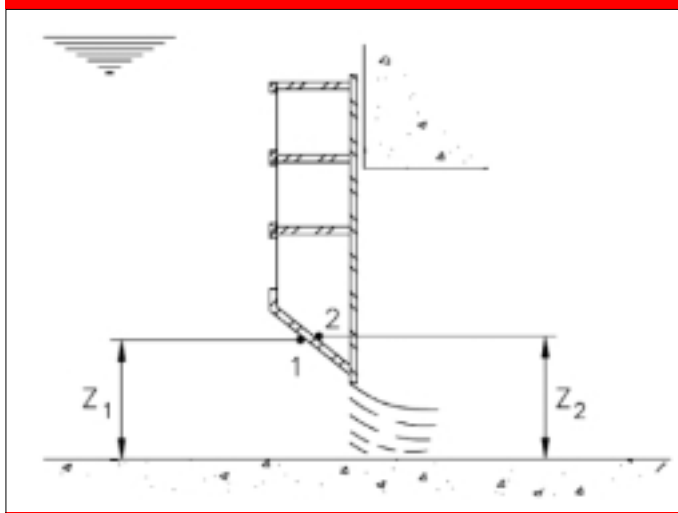


Figura 3 - Condizione di deflusso sotto battente per movimentazione della paratoia (Erbisti et al., 2014).

Come detto, molti sono i fattori geometrici che influiscono su tale parametro e per una descrizione dettagliata si rimanda alla bibliografia.

In genere un metodo affidabile per determinare le forze idrodinamiche è la sperimentazione con modelli di prova in laboratori di idraulica.

Carichi idrodinamici: cavitazione

Il fenomeno della cavitazione è simile a quanto avviene nell'ebollizione poiché consiste nel passaggio di acqua dallo stato liquido a quello di vapore acqueo. Nell'ebollizione, il processo è indotto dall'aggiunta di calore, mentre nella cavitazione il cambiamento di stato è causato da una diminuzione della pressione. Se localmente la pressione all'interno del volume dell'acqua scende al di sotto della tensione di vapore, l'acqua liquida vaporizza e si trasforma in bolle di vapore acqueo. La cavitazione può verificarsi quando un flusso di acqua ad alta velocità passa sopra una irregolarità superficiale tale da aumentare ulteriormente, seppure localmente, la velocità cosicché la pressione può ridursi fino a portare alla formazione di bolle di cavitazione vicino alla superficie solida. Il problema è determinato dal fatto che quando le bolle vengono trascinate dal flusso e passano a valle in una regione a pressione più elevata, collassano trasformandosi nuovamente in acqua liquida, determinando onde di pressione.

Carichi idrodinamici: forze di downpull

Le forze idrodinamiche di downpull si manifestano sul bordo inferiore delle paratoie e sono dovute alla riduzione della pressione dovuta al flusso sottostante.

Nella condizione di paratoia chiusa le pressioni agenti sono definibili con le formule del campo idrostatico. Tale campo statico di forze viene modificato con la movimentazione della paratoia che determina il flusso dell'acqua. In particolare, l'originario profilo idrostatico viene modificato per l'incremento delle velocità ed il conseguente calo delle pressioni.

Si consideri ad esempio il deflusso di acqua sotto battente generato dalla movimentazione della paratoia rappresentato nella figura seguente:

Il movimento del fluido genera una differenza di pressione fra i punti 1 e 2 che si traduce in una forza orientata verso il basso chiamata **forza di downpull**, la cui componente verticale si somma al peso proprio della paratoia.

Le forze di downpull generate ed agenti, naturalmente, dipendono dalla geometria del sistema, ossia dalla forma della paratoia, dalla differenza di quota tra il pelo libero a monte e il fondo del canale, dalla direzione del moto delle particelle di acqua. Gli studi inerenti questo fenomeno sono volti a stimare le relazioni fra la forza di downpull e le grandezze quali la forma ed il grado di apertura della paratoia.

Indicativamente si è stimato che le forze di downpull si massimizzano per gradi di apertura dal 15 al 50%. Al contrario per aperture superiori all'80% è possibile che i coefficienti assumano valori negativi e quindi la forza idrodinamica generata sia rivolta verso l'alto.

La cavitazione è quindi dovuta alla combinazione di elevate velocità di flusso unitamente a basse pressioni nella parete a contatto con il fluido e può portare ad un rapido deterioramento della superficie a contatto, sia essa in metallo che in calcestruzzo.

Il processo della cavitazione è descritto dall'*indice di cavitazione* σ , un numero adimensionale che correla la velocità del flusso idrico con la pressione. L'indice di cavitazione è definito come

$$\sigma = \frac{\frac{P}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma}}{\frac{V^2}{2g}}$$

Dove g è l'accelerazione di gravità, P la pressione del fluido, P_v la pressione di vapore dell'acqua, γ il peso specifico dell'acqua.

L'indice di cavitazione σ è pertanto il rapporto fra l'energia potenziale dell'acqua rispetto alla pressione di vapore (al numeratore) e l'energia cinetica (denominatore). In termini qualitativi, all'aumentare dell'energia cinetica l'indice tende a diminuire e aumenta la possibilità di sviluppo della cavitazione.

1.2 Calcolo delle portate scaricate

Il calcolo della portata scaricata attraverso una luce fa riferimento sostanzialmente a due categorie di luci: a battente e a stramazzo. Nel primo caso la luce si trova ad una quota inferiore al pelo libero; nel secondo il flusso avviene a pelo libero. Nel calcolo della portata transitante, nei due casi, si dovrà tenere conto del fenomeno del rigurgito che può ridurre la portata in misura significativa.

Portata scaricata a battente

La portata attraverso luci a battente può essere valutata con la seguente formula generale:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2g \cdot H}$$

dove $A = a \cdot b$ è l'area della luce e C_d rappresenta il coefficiente di efflusso che tiene conto dell'energia dissipata attraverso la luce e della contrazione laterale della vena.

Il caso più semplice è di una luce a battente rettangolare (altezza a e larghezza b) sotto una paratoia piana, con bordi piani che non permettono la contrazione della vena liquida se non per il solo bordo della paratoia a spigolo vivo.

In tal caso si può stimare un coefficiente di efflusso $C_d = 0,61$.

sopra indicati sono diversi. In letteratura esistono innumerevoli studi e prove sperimentali che permettono di introdurre i valori dei coefficienti più appropriati per ogni caso.

In generale il coefficiente di deflusso dipende dalla forma della paratoia o della valvola. Per una panoramica completa dei valori di coefficiente di deflusso si rimanda alla bibliografia idraulica disponibile.

Idraulica delle luci a sfioro

Quando il contorno superiore non è chiuso ma comunica con l'atmosfera le luci sono a stramazzo. Esistono numerose tipologie di stramazzi; uno dei più noti è lo stramazzo Bazin (Fig.6)

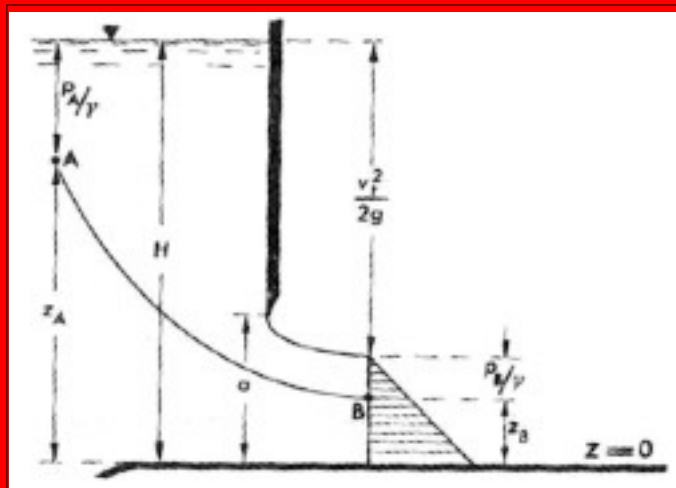


Figura 4 - Deflusso attraverso luce a battente sotto la paratoia (Citrini Nosedà, 1987).



Figura 5 - Esempio di deflusso attraverso una luce a battente data dal sollevamento di una paratoia piana.

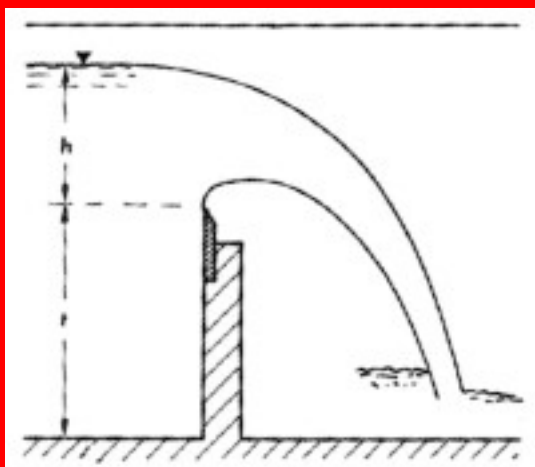


Figura 6 - Stramazzo Bazin (Citrini Noseda, 1987).

La formula generica per il calcolo della portata esitata da una luce a stramazzo è:

$$Q = C_{ds} \cdot L \cdot h \cdot \sqrt{2gh}$$

in cui C_{ds} rappresenta il coefficiente di deflusso. Nel parametro L , che indica la lunghezza dello sfioro, si deve anche considerare la presenza e la forma delle spalle e delle pile che delimitano la luce.

Come per il caso delle luci a battente lo studio del deflusso attraverso uno stramazzo si riconduce alla valutazione ed alla stima del coefficiente di deflusso al variare delle condizioni al contorno.

In generale il coefficiente di deflusso per uno stramazzo dipende dalla geometria dello stramazzo. Si è soliti distinguere gli stramazzi in base allo spessore. Si hanno così:

- 1) Stramazzo in parete grossa per il quale il coefficiente di deflusso è minimo; tipico valore di bibliografia è $C_{ds} = 0,385$
- 2) Stramazzo in parete sottile per il quale si ha $C_{ds} = 0,41 \div 0,42$
- 3) Stramazzo con parete sagomata (Scimemi, Creager) per il quale si possono raggiungere valori di C_{ds} anche fino a 0,50; il tipico valore di letteratura è $C_{ds} = 0,48$

Il valore del coefficiente di deflusso dipende anche dall'altezza della vena liquida sopra la soglia sfiorante. Da tenere in conto anche la velocità di arrivo della portata che può non essere trascurabile ed influenzare in maniera sensibile il coefficiente di deflusso.

In bibliografia si trovano numerose formule che trattano nel dettaglio i vari casi sopra indicati.

Condizioni di rigurgito

Una situazione idraulica particolare che si verifica soprattutto in corrispondenza di traverse fluviali è quella del *deflusso rigurgitato* che avviene quando il livello dell'acqua a valle è superiore a quello della soglia sfiorante ed è tale da alterare il deflusso sopra la soglia sfiorante stessa. In questo caso le formule della foronomia indicate nei paragrafi precedenti possono essere usate, adattando i coefficienti di deflusso. In alcuni casi, tuttavia, si deve cambiare la struttura stessa della formula. Si tratta di un problema di tipo idraulico che non dipende se non in parte dal tipo di paratoia o valvola e per il quale, esulando dalla presente trattazione, si rimanda alla bibliografia.

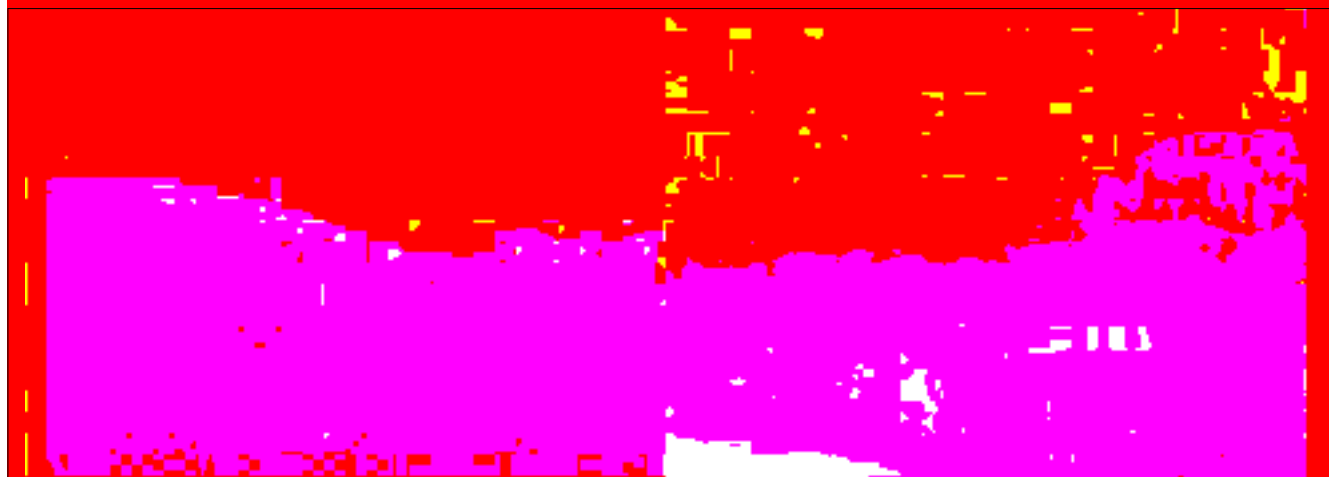


Figura 7 - Rigurgito su uno sfioratore.

1.3 Comportamento dinamico indotto da introduzione di aria

Vortici d'aria

La presenza di vortici liberi può determinare il trascinamento di aria all'interno del condotto di scarico. L'introduzione di aria in un condotto può indurre dannose fluttuazioni di pressione alla paratoia di controllo dovute al precedente accumulo di aria in pressione nella parte di monte della paratoia.

La formazione di vortici liberi deve perciò evitarsi e a tal fine è essenziale dimensionare correttamente la profondità minima del condotto e della paratoia rispetto al pelo libero e rispetto alla velocità della corrente.

Richiesta d'aria per flusso al di sotto di una paratoia

Quando una paratoia verticale viene aperta in un condotto e la parte di valle del condotto non contiene acqua, si origina una richiesta di aria che viene trascinata dalla corrente.

Richiesta d'aria per flusso al di sopra di una paratoia

Quando l'acqua fluisce a sfioro al di sopra di una paratoia può trascinare anche l'aria sottostante alla vena liquida riducendo di fatto la pressione in questo spazio. Le eventuali conseguenti condizioni di depressione possono causare l'oscillazione della vena, la fluttuazione del livello dell'acqua e, anche, vibrazioni sulla paratoia. Per evitare questi fenomeni è necessario immettere aria (aerare) lo spazio sottostante la vena. Questo può essere fatto tramite divisori di flusso che rompono localmente la lama d'acqua consentendo l'immissione di aria attraverso i varchi nella vena. Altro metodo di ventilazione è il ricorso ad appositi condotti.

Spesso i sistemi vengono abbinati.

1.4 Comportamento dinamico per effetto delle vibrazioni causate dal flusso d'acqua

Eventuali vibrazioni sono un importante difetto per le paratoie e per il sistema di sollevamento poiché possono determinare danni strutturali o rappresentare un vincolo all'operatività a certe aperture. Di particolare gravità è la risonanza. A volte le vibrazioni di una paratoia possono avvenire sotto specifiche condizioni idrauliche che si possono manifestare anche dopo anni dall'installazione.

Le verifiche della sicurezza e della stabilità devono essere effettuate non solo in relazione ai carichi statici agenti ma anche agli effetti dinamici determinati dal flusso d'acqua. Questo aspetto risulta di particolare importanza per le paratoie poste a regolazione della portata; il funzionamento delle paratoie può essere compromesso da fenomeni solo apparentemente secondari come, appunto, le vibrazioni.

Vibrazioni possono manifestarsi per un'insufficiente rigidità della struttura: a livello progettuale esistono prescrizioni tecniche orientate a ridurre il più possibile la deformabilità della struttura che, per esempio, pongono limiti alla freccia della trave orizzontale (minore di 1/800 della luce) e a quella dello schermo (inferiore allo 0,4 del suo spessore) per ridurre il comportamento membranale.

La più comune causa di vibrazioni, in assenza di tracimazione, consiste in una forma geometria inadeguata dei dispositivi di tenuta al bordo inferiore della paratoia e riguarda quindi la progettazione di tali particolari costruttivi.

In questo ambito il problema viene considerato a priori seguendo, nella definizione dei dettagli, alcune indicazioni fornite da specifici manuali di progettazione. Per esempio, per il caso in esame, dispositivi a nota musicale non sono consigliati poiché la loro geometria tende a determinare, in prossimità del bordo della paratoia, un flusso intermittente d'acqua che induce vibrazioni. Per analoghi motivi sono da escludere guarnizioni piatte in legno. La configurazione migliore sembra essere una guarnizione piatta, di gomma.

In alcuni casi però è necessario ricorrere ad analisi specialistiche, quando per esempio il flusso, in prossimità della paratoia, assume andamenti anomali.

Si possono verificare problemi di vibrazioni anche in caso di tracimazione d'acqua sopra la paratoia, in particolare per le ventole, dovute come visto precedentemente a problemi di aerazione.

Per evitare tale problema risulta efficace l'inserimento, alla sommità della paratoia, di schermi laterali per convogliare la portata di tracimazione e di dispositivi a pettine per frazionare il flusso e favorire l'aerazione della zona sotto il getto.

Questo tipo di problemi può essere aggravato dall'elevata presenza nel bacino di corpi galleggianti, detriti e sedimenti ecc. che tendono ad ammassarsi contro le stesse.

2. VERIFICA STRUTTURALE IN CONDIZIONI STATICHE

Generalmente il progetto e la verifica delle paratoie possono essere condotti avvalendosi di schemi di analisi bidimensionali. Lo schema bidimensionale è applicabile anche alle paratoie radiali qualora la curvatura del diaframma possa essere trascurata. In qualche caso si deve ricorrere ad analisi agli elementi finiti avvalendosi di un modello tridimensionale. In accordo con le normative e gli standard di progettazione nazionali e internazionali, le verifiche di sicurezza devono essere condotte per gli stati limite di esercizio e ultimi per la definizione dei carichi da applicare e delle prestazioni richieste.

Per la verifica strutturale delle paratoie si può fare riferimento alla norma DIN 19704-1 "Hydraulic steel structures - part 1: criteria for design and calculation" (vedi cfr. *Santoro et al., Aspetti normativi*). Nei successivi paragrafi si riassumono, con riferimento alla suddetta norma, le modalità per l'esecuzione delle verifiche.



2.1 Azioni e Combinazioni di carico

Le azioni generalmente considerate per il calcolo strutturale delle paratoie sono di tre tipi:

Carichi permanenti rappresentati dal peso proprio della struttura incrementata del 5-10% (per tener conto del contributo della verniciatura, dell'acqua o del ghiaccio in aderenza, della vegetazione o dello sporco che può accumularsi presso la paratoia).

Azioni variabili:

- carichi idrostatici
- carichi idrodinamici
- peso dell'acqua agente durante la movimentazione della paratoia
- carico e pressione del ghiaccio
- altri carichi imposti in situazioni particolari (traffico, ballatoi o corrimano, ecc...)
- carichi dovuti a variazioni delle condizioni di vincolo
- carico da vento
- carico dovuto a variazioni di temperatura

Carichi accidentali (ad esempio inceppamento della paratoia e gate jamming).

Le combinazioni da considerare per la verifica statica di una paratoia sono le seguenti:

- Condizione di carico Normale (Load case 1 della DIN 19704): la paratoia è soggetta al carico idrostatico determinato da un livello d'acqua in condizioni normali di esercizio;
- Condizione di carico Eccezionale (Load case 3 della DIN 19704): la paratoia è soggetta al carico idrostatico determinato da un livello d'acqua in condizioni eccezionali;
- La paratoia è soggetta ad inceppamento (gate jamming - Load case 3 della DIN 19704).

Le azioni e i coefficienti parziali per la verifica allo stato limite ultimo sono definiti dalla norma DIN 19704, cui si rimanda per maggiori dettagli.

2.2 Verifica strutturale

A titolo di esempio si riportano i metodi di calcolo delle due tipologie di paratoie a maggior diffusione.

Verifica strutturale paratoia piana

Consiste nella verifica dei seguenti elementi principali:

- diaframma
- travi orizzontali
- irrigidimenti verticali.

Lo stato di sforzo del diaframma, considerato come una piastra appoggiata in corrispondenza delle travi orizzontali e degli eventuali irrigidimenti verticali, si calcola secondo la teoria elastica delle piastre.

Il numero di travi orizzontali viene definito in modo da individuare la soluzione tecnico economica più vantaggiosa, considerando l'inerzia minima richiesta per le travi orizzontali e che un numero maggiore di travi riduce lo spessore del diaframma.

Per paratoie di grandi dimensioni, la spaziatura delle travi orizzontali è generalmente variabile, più fitta nella parte inferiore.

Una volta definito il numero delle travi orizzontali, la verifica viene eseguita considerandole elementi appoggiati agli estremi e soggette alla pressione idrostatica per la luce d'influenza. Gli sforzi così calcolati vanno combinati con gli sforzi dovuti ai momenti d'incastro ricavati dalla verifica del diaframma.

Nella verifica allo stato limite di esercizio, le frecce massime devono essere confrontate con il valore ammissibile che viene definito in modo da garantire adeguata performance delle guarnizioni e non compromettere la movimentazione della paratoia. Valori tipici delle frecce massime considerate in fase di progetto variano da 1/500 a 1/800 della luce della paratoia.

Verifica strutturale paratoia radiale

Le paratoie radiali sono generalmente progettate secondo uno dei due seguenti schemi statici:

- a) la struttura portante è costituita da travi orizzontali minori che appoggiano su due travi verticali principali, le quali a loro volta appoggiano sui bracci in corrispondenza delle due travi orizzontali principali.
- b) la struttura portante è costituita da travi verticali che appoggiano su due travi orizzontali principali, le quali a loro volta appoggiano sui bracci.



La verifica strutturale considera i seguenti elementi principali:

- diaframma
- travi verticali
- travi orizzontali
- eventuali rinforzi
- bracci
- perni di aggancio, aste di sollevamento e perni di rotazione.

Il diaframma si segue la procedura descritta per le paratoie piane, schematizzandolo come una piastra appoggiata sulle travi verticali e orizzontali.

Per le travi, la verifica è diversa a seconda dello schema statico di progetto.

Nel caso a) le travi orizzontali minori sono dimensionate considerandole appoggiate in corrispondenza delle due travi verticali e soggette alla pressione idrostatica per la relativa luce di influenza. Le travi verticali sono calcolate come strutture appoggiate in corrispondenza dei bracci e soggette a carichi concentrati in corrispondenza delle travi orizzontali.

Analogamente nel caso b) le travi verticali si dimensionano considerandole appoggiate in corrispondenza delle due travi orizzontali e soggette alla pressione idrostatica per la relativa luce di influenza. Le travi orizzontali sono calcolate come strutture appoggiate in corrispondenza dei bracci e soggette a carichi concentrati in corrispondenza delle travi verticali.

La verifica strutturale dei bracci viene generalmente eseguita considerando la struttura a telaio avente come montanti una coppia di bracci e come traverso la trave orizzontale. I bracci sono soggetti alle seguenti azioni:

- compressione dovuta ai carichi idraulici
- peso proprio
- attrito nei cuscinetti
- forze trasmesse dagli organi di movimentazione
- momenti flettenti in corrispondenza dei supporti.

Verifica delle parti fisse

La verifica strutturale delle parti fisse della paratoia include anche la verifica delle parti inghisate.

La verifica delle rotaie di scorrimento viene in genere eseguita, previa verifica della pressione hertziana sotto il carico in corrispondenza delle piste per le paratoie a ruote o della massima pressione di contatto per le paratoie a strisciamento, secondo la teoria delle travi su suolo elastico.

3. COMPORTAMENTO DINAMICO NEI CONFRONTI DEL SISMA

Sebbene le dighe storicamente abbiano manifestato un livello di resistenza eccellente nei confronti dei terremoti, le catastrofiche conseguenze di un danneggiamento o collasso impongono di non trascurare il continuo controllo non solo del corpo diga, ma anche, come prescritto dal D.M. 26 giugno 2014 9 di “ogni componente del serbatoio, critico ai fini della sicurezza”: fra i componenti critici sono incluse le paratoie degli sfioratori e gli scarichi di fondo atti a garantire il deflusso controllato dal serbatoio. Anche le istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica (D.M. 26 giugno 2014 e D.M. 17 gennaio 2018), emesse dalla Direzione Generale Dighe a luglio 2018, ribadiscono con chiarezza che “i livelli di sicurezza richiesti nei confronti degli SLU e SLE devono essere garantiti non soltanto dallo sbarramento in senso stretto, ma anche da tutte le opere che con esso interagiscono e che concorrono a garantire la funzionalità dell'impianto (SLE) e la capacità di ritenuta (SLU)”.

Le indicazioni della normativa nazionale, sottolineando che anche le opere accessorie devono essere incluse nell'analisi sismica, sono d'altra parte coerenti con le normative e le raccomandazioni internazionali: in generale, nelle norme e nelle raccomandazioni nazionali e internazionali, si richiede che i dispositivi di intercettazione degli organi di scarico atti a controllare opportunamente il livello del serbatoio e, qualora necessario, a rilasciare l'acqua in modo sicuro, debbano restare funzionali e possano essere azionati anche a seguito di un terremoto. Vale a dire che le paratoie degli sfioratori e gli scarichi di fondo (cioè gli organi di intercettazione che concorrono alla funzione di ritenuta e di controllo del livello di invaso), devono rimanere azionabili (quindi anche i motori, le unità di controllo, gli alimentatori e i generatori di emergenza devono rimanere accessibili e funzionanti), e allo stesso tempo non devono subire deformazioni inelastiche che possano causarne l'inceppamento. Per garantire che l'apertura e la chiusura delle paratoie non vengano compromesse, è necessario che anche le pile di supporto non subiscano deformazioni anelastiche, in particolare nella direzione spalla-spalla dello sbarramento, e che non si verifichino movimenti differenziali dei giunti della struttura di supporto. Fra gli altri modi di rottura in Wieland et al. (2017) si ricordano anche la rottura dei contrappesi, dei pistoni o di altri componenti del sistema ope-



rativo della paratoia e i danneggiamenti causati dalla caduta di oggetti massivi (quali travi di ponte, gru a cavallo, motori, contrappesi, ecc.). Infine, i perni non devono essere danneggiati dalle sovrappressioni causate dall'azione idrodinamica del bacino. In Wieland (2007) si osserva che spesso in fase di progettazione delle paratoie c'è scarsa comunicazione fra gli ingegneri responsabili della progettazione delle opere strutturali e quelli responsabili della progettazione delle componenti meccaniche.

In letteratura esistono pochissimi casi che riportano danneggiamenti occorsi a paratoie in occasione di eventi sismici. Per quanto riguarda il contesto nazionale il gruppo di lavoro ITCOLD "Comportamento delle dighe sottoposte a sollecitazioni sismiche" che ha esaminato il comportamento delle dighe italiane in occasione di eventi sismici non ha evidenziato alcun incidente che abbia coinvolto paratoie o altri organi di intercettazione (ITCOLD, 2018). Anche nello studio condotto per ENEL nel 2009 (Masera, 2009), che ha preso in considerazione il comportamento sismico degli organi di scarico, non sono riportati casi italiani di incidenti a opere di intercettazione e scarico in occasione di terremoti.

Fra gli incidenti occorsi in ambito internazionale in occasione di terremoti, sono citati quello alla diga di Shih-Kang a Taiwan (Fig. 8), durante il terremoto di Chi-Chi di magnitudo 7.3 e quello alla traversa di Tai Ping Yi in Cina, durante il terremoto di Sichuan di magnitudo 8. La diga di Shih-Kang, uno sbarramento costituito da 18 paratoie e due luci di scarico, fu seriamente danneggiata dal forte sisma: il danno più evidente verificò in corrispondenza degli sfioratori 16, 17 e 18 vicino alla spalla destra a causa di uno scorrimento verticale di diversi metri della faglia sottostante la struttura (Wieland et al., 2017; Masera, 2009). Nel caso della traversa di Tai Ping Yi invece si verificò la rottura di un braccio di una paratoia radiale a causa della caduta di massi conseguente al sisma (Masera, 2009).



Figura 8 - Diga di Shih-Kang danneggiata dal terremoto di Chi Chi (Wieland et al., 2017).

Si rilevarono danni, presumibilmente dovuti all'aumento della pressione dell'acqua, a carico di due paratoie radiali degli scarichi intermedi, chiuse al momento del terremoto. In particolare, i danni riscontrati furono fenomeni di instabilità dei bracci, distorsioni, danneggiamenti delle guarnizioni con conseguenti perdite (Wieland, 2017; Bouquier et al., 2016; Gobbi, 2004).

I seppure pochi incidenti sopra riportati evidenziano come il terremoto costituisca una fonte di pericolosità multipla in quanto i danneggiamenti alle strutture possono conseguire oltre che dallo scuotimento del terreno e dal movimento delle faglie, anche da sovrassollecitazioni conseguenti a fenomeni di tracimazione, fenomeni di frana delle sponde, caduta di massi o di elementi massivi in genere o anche da fenomeni secondari indotti da danni causati dal terremoto ad altre strutture.

Per la valutazione sismica degli organi di intercettazione, come di qualsiasi altra struttura, è necessario prima di tutto definire gli eventi sismici di progetto (generalmente selezionati coerentemente con le normative nazionali)

Durante il terremoto Wenchuan di magnitudo 7.9, occorso in Cina nel 2008, un impianto ad acqua fluente fu tracimato a causa della mancata apertura di tutte le paratoie (Masera, 2009; Wieland, 2017). Alcune fonti riportano che anche in questo caso il malfunzionamento delle paratoie possa essere stato causato dalla caduta di massi (Masera, 2009).

Uno degli incidenti meglio documentati a carico delle opere di intercettazione è quello della diga di Sefid Rud (Iran) a gravità alleggerita, che nel 1990 fu scossa da un terremoto di magnitudo 7.3.

per gli stati limite di esercizio e ultimo, quindi scegliere il metodo di analisi più adatto al problema preso in esame e al grado di approfondimento richiesto dalla verifica. Per la valutazione della sicurezza sismica delle paratoie è necessario considerare gli effetti di amplificazione della struttura: vale a dire che l'accelerazione valutata per l'analisi sismica dello sbarramento deve opportunamente essere rivalutata alla cresta della diga (o in corrispondenza dello sfioratore su cui sono impostate le paratoie) (Lewin, 2001). Tali effetti di amplificazione possono essere significativi e comportare un incremento dell'accelerazione rispetto a quelle alla base della struttura di supporto di 2÷5 volte (ICOLD, 2002).

Per le opere esistenti, inoltre, preliminarmente all'analisi sismica è necessario esaminare il comportamento degli organi di intercettazione durante l'esercizio, per evidenziare eventuali insufficienze originarie legate a carenze progettuali o realizzative, o criticità successivamente intervenute. In particolare, anche attraverso l'esame della documentazione disponibile, occorre controllare il comportamento mediante l'esame della serie storica dei dati di monitoraggio, ponendo particolare attenzione all'esame della risposta agli eventi sismici avvenuti durante l'esercizio.

3.1 Metodi di analisi

Analogamente a quanto osservato per la valutazione del comportamento statico, il progetto e la verifica sismica degli organi di intercettazione possono essere condotti avvalendosi, qualora possibile, di schemi bidimensionali e di un approccio di calcolo di tipo pseudo-statico, ricorrendo ad analisi tridimensionali e/o a metodi di analisi più sofisticati solo per problemi di particolare complessità coerentemente con l'approccio progressivo di analisi suggerito dalla letteratura tecnica (USACE, 2003; 2007; FEMA, 2005).

Il metodo pseudo-statico rappresenta le forze sismiche come forze statiche equivalenti pari alla massa effettiva della struttura moltiplicata per l'accelerazione valutata sullo spettro di risposta alla base dell'opera analizzata. L'analisi pseudo-statica ha affidabilità maggiore se la frequenza fondamentale della struttura in analisi è superiore a 33 Hz poiché in tali condizioni la risposta dell'opera è verosimilmente di tipo "rigido" (ICOLD, 2002). Tuttavia per molte paratoie si sono rilevate frequenze inferiori, dell'ordine di 3÷12 Hz (Lewin, 2001): l'analisi pseudo-statica può essere ancora utilizzata (preferibilmente per valutazioni di carattere preliminare) purché l'accelerazione spettrale da utilizzare nel calcolo sia quella corrispondente al primo modo di vibrare della paratoia (mentre nel caso di struttura rigida si può fare riferimento alla PGA - peak ground acceleration) (ICOLD, 2002), opportunamente rivalutata per tenere conto degli effetti di amplificazione della struttura di supporto; qualora inoltre gli effetti di diversi modi di vibrare siano significativi devono essere tenuti in conto nell'analisi; nel bollettino ICOLD 123 (ICOLD, 2002) si suggerisce che l'effetto dei modi superiori possa essere tenuto in conto moltiplicando l'accelerazione del primo modo per un coefficiente amplificativo dell'ordine di 1.5.

Un'analisi pseudo-statica su modello bidimensionale potrebbe non essere in grado di rappresentare adeguatamente gli importanti effetti tridimensionali che si possono verificare in una paratoia (in particolare se radiale), che sarebbero invece ben descritti da una modellazione agli elementi finiti tridimensionale, sebbene tale modellazione sia più onerosa dal punto di vista computazionale e tecnicamente più complessa, realizzando l'analisi del sistema con l'approccio dello spettro di risposta, oppure con l'approccio del transitorio dinamico con l'utilizzo di accelerogrammi. Alcuni esempi di confronto fra la modellazione pseudo-statica e dinamica (Daniell et al., 1999; Gobbi et al., 2005), uno dei quali riportato nel paragrafo 3.4, hanno mostrato come, non in tutti i casi, il risultato della prima sia conservativo.

3.2 Azioni e combinazioni di carico

Come specificato nel paragrafo 3, la sicurezza sismica delle opere accessorie deve essere considerata per gli stati limite di esercizio e ultimi. In particolare, tanto per gli scarichi quanto per le relative opere di intercettazione è richiesta la verifica agli stati limite di esercizio con riferimento sia allo stato limite di operatività (SLO) sia allo stato limite di danno (SLD): è possibile, tuttavia, effettuare una sola verifica se le prestazioni dello SLO sono garantite adottando le azioni dello SLD. Agli stati limite ultimi la verifica si effettua con riferimento allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) (Circolare Direzione Generale Dighe 26 luglio 2018 n. 17281 e s.m.i.). Per ciascuno stato limite è definita un'azione sismica in termini di accelerazione e di spettro di risposta con riferimento a prefissate probabilità di accadimento nel periodo corrispondente alla vita di riferimento della struttura. In assenza di indicazioni normative specifiche per le opere di scarico e intercettazione quale combinazione di carico può essere ragionevole assumere la combinazione sismica indicata per la verifica dell'intera struttura.

Si osserva che i possibili meccanismi di collasso possono verificarsi contestualmente all'evento sismico o svilupparsi durante le fasi post-sismiche, come effetto di una propagazione o redistribuzione, transitoriamente sfavorevole alla stabilità, delle deformazioni/stati tensionali e delle pressioni interstiziali accumulate durante la fase sismica. Nell'innescio dei fenomeni può giocare un ruolo sfavorevole anche l'occorrenza di repliche (after-shock).



Interazione fluido-struttura

Un aspetto importante nella valutazione della risposta sismica di una paratoia è la interazione dinamica di questa con il bacino; l'interazione si traduce in un incremento delle pressioni esercitate dall'acqua. In generale, il problema dell'interazione fluido-struttura per la valutazione della risposta sismica delle paratoie si risolve sotto l'ipotesi di struttura rigida, tale da trasmettere inalterato all'invaso il moto sismico ricevuto dal supporto: il problema viene così a coincidere con la ricerca delle pressioni idrodinamiche che si generano su un paramento di monte soggetto a un moto sismico. Tali pressioni, approssimate da una parabola (Fig. 9) possono essere espresse avvalendosi della formulazione di Westergaard (1933):

$$p = c_p H \rho_w \ddot{u}_g = \frac{7}{8} \sqrt{\frac{y}{H}} \rho_w \ddot{u}_g$$

dove c_p indica il coefficiente di pressione, H la profondità dell'invaso, y l'affondamento rispetto al pelo libero (y/H la profondità relativa), ρ_w la densità dell'acqua e $\ddot{u}_g$ l'accelerazione sismica.

Le ipotesi fondamentali sono le seguenti:

- struttura rigida;
- paramento di monte piano e verticale;
- moto sismico orizzontale (applicato alla base della paratoia);
- invaso infinito;
- acqua incompressibile.

La formula di Westergaard mostra che le pressioni idrodinamiche esercitate dal bacino sulla struttura equivalgono a forze d'inerzia di una massa (massa aggiunta) distribuita sulla superficie del paramento di monte: tale distribuzione è caratterizzata da una densità (per unità di superficie) crescente con la profondità e di valore pari a $c_p H \rho_w$.

Sebbene le ipotesi alla base della formulazione di Westergaard (in particolare quelle di struttura rigida e verticale) non siano a rigore sempre valide, tale formulazione è comunque ampiamente utilizzata per la valutazione sismica delle paratoie ed è in generale considerata un'approssimazione sufficiente.

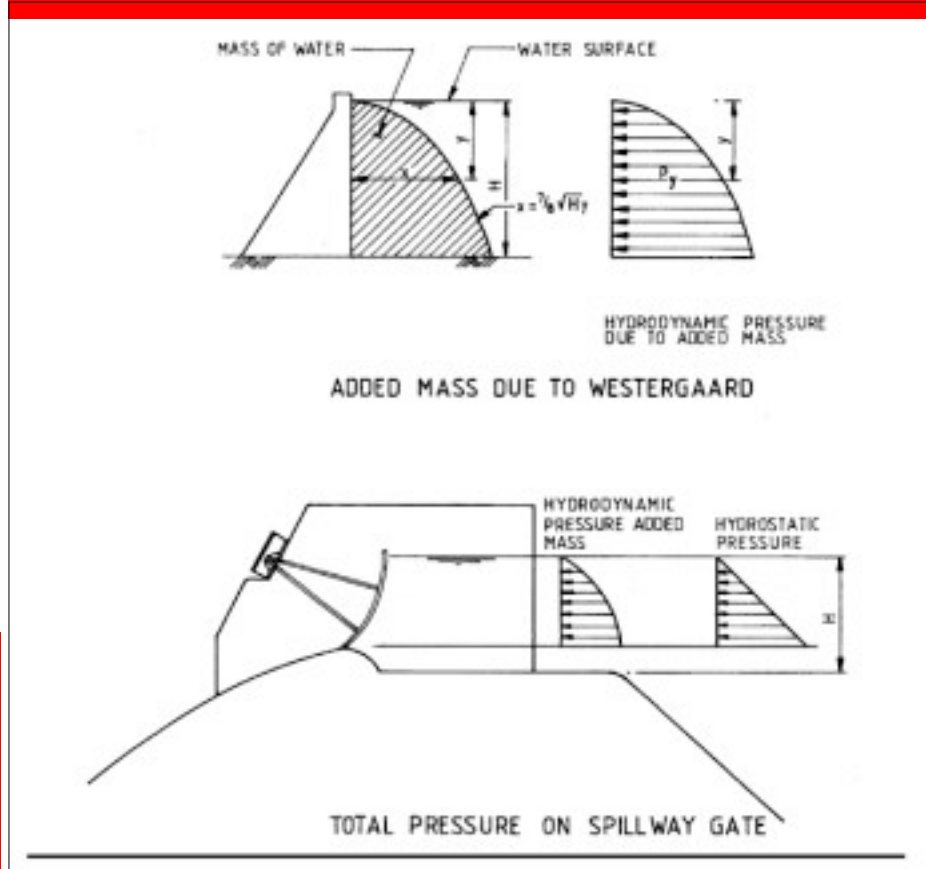


Figura 9 - Masse aggiunte alla Westergaard e pressioni idrodinamiche causate su una paratoia (Lewin, 2001).

È importante osservare che, come osservato a proposito dell'incidente alla diga di Seftid Rud, nel caso delle paratoie l'azione delle pressioni idrodinamiche può comportare un incremento significativo delle forze d'inerzia in gioco a cui consegue, in particolare nel caso delle paratoie radiali, un incremento notevole dell'azione assiale nelle briglie dei bracci laterali che è poi trasmessa ai perni di sostegno e che può determinare la crisi per instabilità degli elementi compressi o causare danni ai perni e ai loro ancoraggi nella muratura.

3.3 Criteri di verifica

La normativa nazionale richiede che agli stati limite di esercizio le strutture lavorino in campo elastico, concedendo solo piccole escursioni che comportino lievi danni (riparabili). In questo caso, perciò, saranno effettuate verifiche in termini di eccesso di tensioni

o spostamenti sia delle componenti strutturali delle paratoie e degli organi di intercettazione, sia degli organi di manovra (i.e. ruote, perni, cerniere, meccanismi di sollevamento, ecc.), sia delle parti della struttura dello sbarramento con cui si interfacciano.

Per gli stati limite ultimi le verifiche di sicurezza delle paratoie e degli organi di intercettazione e delle parti della struttura dello sbarramento con cui si interfacciano dovranno essere effettuate con riferimento alle seguenti condizioni:

- Instabilità o rottura;
- Deformazioni che provocano danni strutturali o la tracimazione;
- Meccanismi di rottura locali.

Quando si prendono in considerazione azioni sismiche, soprattutto se di forte intensità, è opportuno concentrare la verifica prevalentemente sulle deformazioni, controllando che eventuali deformazioni della struttura metallica o dei suoi supporti non siano superiori alle tolleranze disponibili tra le varie parti in movimento e non ne comportino quindi il blocco o l'impossibilità a operarli in caso di necessità.

In genere le suddette verifiche consistono nel controllo che l'entità delle deformazioni residue della struttura metallica, e della struttura dello sbarramento con cui si interfacciano, sia compatibile con i requisiti nei confronti sia degli stati limite di esercizio (SLO/SLD) sia degli stati limite ultimi (SLV/SLC). Nello specifico, per i diversi stati limite, le deformazioni residue calcolate dovranno essere:

- allo SLO nulle o trascurabili;
- allo SLD di entità tale da non pregiudicare lo scarico controllato dell'acqua;
- allo SLV e allo SLC di entità tale da non comportare il rilascio incontrollato dell'acqua.

Oltre che alle normative di riferimento nazionali è possibile anche riferirsi ai criteri di verifica alle norme tedesche DIN, dalle raccomandazioni internazionali e agli Eurocodici (*cfr. Santoro et al., paragrafo 3*). Un altro importante riferimento è il bollettino ICOLD 123 (2002).

Indipendentemente dal metodo di analisi selezionato e dai criteri adottati, la valutazione finale della sicurezza sismica dovrebbe essere basata sul giudizio ingegneristico e sull'esperienza con strutture simili, pur tenendo presente che nel caso delle dighe ciascuna struttura costituisce un unicum.

3.4 Esempi di modellazione numerica

Si riporta, a titolo di esempio e a supporto di quanto riportato nei precedenti paragrafi, il confronto fra i risultati dell'analisi sismica condotta (*Gobbi et al., 2005*) impiegando per l'analisi strutturale il metodo pseudo-statico e quello dinamico per una paratoia a settore e per una a settore con contrappeso, in considerazione del comportamento critico che tali tipologie di paratoie possono avere nei riguardi dell'azione sismica (a differenza di altre tipologie, per esempio le paratoie piane, che appaiono meno vulnerabili). I modelli a elementi finiti adottati nelle analisi sono mostrati in *Figura 10*.

Lo studio, di cui si riportano sinteticamente le principali considerazioni emerse, ha consentito di verificare come il metodo



Figura 10 - Modello numerico della paratoia a settore (sopra) e della paratoia a settore con contrappeso (sotto) (*Gobbi et al., 2005*).



pseudo-statico fornisca una stima delle sollecitazioni e degli spostamenti non sempre a favore di sicurezza. Ne consegue che tale metodo può fornire una valutazione approssimata del comportamento sismico della struttura che può essere determinato con un elevato grado di affidabilità solo mediante un'analisi dinamica.

Nel caso della paratoia a settore semplice sia per le analisi pseudo-statiche, sia per quelle dinamiche, le verifiche tensionali sono risultate sostanzialmente soddisfatte anche se con margini piuttosto differenti nei riguardi del carico di snervamento (le analisi dinamiche hanno evidenziato valori delle sollecitazioni nei vari elementi strutturali e delle reazioni vincolari nei perni superiori pari a circa il doppio di quelli calcolati con le analisi pseudo-statiche). Con riferimento ai livelli tensionali, si può ritenere che per la verifica di paratoie esistenti di dimensioni relativamente modeste e/o per siti di non elevata sismicità, l'approccio pseudo-statico possa ritenersi sostanzialmente affidabile purché si abbiano ampi margini di resistenza nei riguardi dei limiti di snervamento del materiale. Qualora l'analisi pseudo-statica fornisse invece sollecitazioni prossime ai limiti di snervamento, si ritiene consigliabile effettuare una ulteriore verifica ricorrendo all'analisi dinamica. In fase di progetto di una nuova paratoia, invece, è più opportuno fare riferimento direttamente all'analisi dinamica che può consentire una migliore ottimizzazione del dimensionamento strutturale.

Le analisi pseudo-statiche hanno evidenziato come l'entità degli spostamenti laterali (spalla-spalla) del diaframma possano essere rilevanti in occasione di sisma; sono da attendersi perciò danneggiamenti negli elementi di tenuta laterale che dovrebbero essere controllati, in particolare dopo ogni evento sismico significativo.

Per quanto riguarda la tendenza al sollevamento, entrambi i tipi di analisi hanno confermato il sostanziale mantenimento del contatto della paratoia con la soglia sfiorante; perciò il rilascio di acqua è escluso.

Anche nel caso della paratoia a settore con contrappeso le analisi dinamiche hanno evidenziato valori delle sollecitazioni nei vari elementi superiori (circa doppi) rispetto a quelli calcolati con le analisi pseudo-statiche. Tuttavia, in questo caso, sia per le analisi pseudo-statiche, sia per quelle dinamiche, le verifiche tensionali non sono tutte soddisfatte, in particolare per gli elementi compressi della parte di struttura che sostiene il contrappeso. I margini relativi alla violazione del criterio di verifica nei riguardi del carico di snervamento sono differenti a seconda che ci si riferisca ai risultati dell'analisi pseudo-statica o dinamica; tuttavia questo risultato dimostra che alcuni elementi sono stati dimensionati in fase di progetto con un margine di sicurezza più ridotto rispetto a quello della struttura nella sua globalità. Questo tipo strutturale appare perciò poco idoneo a far fronte alle azioni sismiche dinamiche: l'aspetto più significativo è la tendenza dei bracci che sostengono i contrappesi ad andare in risonanza, in quanto il sisma (nel caso studiato) ha un contenuto energetico a frequenze prossime a quelle della struttura. Dunque, gli spostamenti non si smorzano nel tempo ma si mantengono su valori di picco particolarmente rilevanti e tali da determinare possibili interferenze con altri elementi strutturali (ad esempio, le pile). Anche per quanto riguarda la tendenza al sollevamento, le paratoie a settore con contrappeso, sono particolarmente sensibili a eventi sismici anche di modesta entità.

BIBLIOGRAFIA

Bouquier P., Kashiwayanagi M., 2016. *A comparison of mechanical design criteria for Gates, between Japan and France, and their relevant consequences on earthquake resistance*, in proceedings of Saint Malo International Symposium.

Circolare Direzione Generale Dighe 26 luglio 2018 n. 17281 e s.m.i.) *Verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari e accessorie. Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) ed al D.M. 17.01.2018 (NTC18)*. Revisione n. 1 di cui alla nota prot. 16790 del 03.07.2019.

Citrini C. & Nosedà G., 1987. *Idraulica* - Seconda edizione.

Daniell W., Taylor C., 1999. *Seismic study of Kilmorack Dam radial gate, report for Scottish and Southern Energy, University of Bristol, Earthquake Engineering Research Centre*.

Decreto Ministeriale, 26 Giugno 2014. *Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)*. Gazzetta Ufficiale, n. 156, 08 07 2014.

Erbisti P. C. F., 2014. *Design of hydraulic gates* - 2nd edition.

Fanelli G., 2000. *Il controllo della sicurezza delle paratoie*, marzo.

FEMA, 2005. *Federal Guidelines for Dam Safety - Earthquake Analyses and Design of Dams*, FEMA 65.

Gobbi M.E., 2004. *Analisi del comportamento in esercizio e in presenza di sisma di opere accessorie: Stato dell'arte*, Rapporto RdS CESI.

Gobbi M.E., Bettinali F., Cadei R., 2005. *Analisi numeriche per la valutazione del comportamento sismico di paratoie a supporto della definizione di linee guida per la verifica strutturale*, Rapporto RdS CESI.

Hydropower & Dams, 2014. *Learning from experience to enhance hydraulic gate safety*, n. 1.

ICOLD, 2002. *Seismic design and evaluation of structures appurtenant to dams. Guidelines*. Bulletin 123.

ITCOLD, Gruppo di Lavoro, 2018. *Comportamento delle dighe italiane in occasione di terremoti storici*, Rapporto Finale.

Lewin J., 2001. *Hydraulic gates and submerged outlets* - 2nd edition.



Masera A., 2009. *Studio del comportamento degli organi di scarico di una diga in presenza di sisma*, Rapporto ISMES per ENEL GEM - ICI S.p.A..

U.S. Army Corps of Engineers, 2001. *Inspection, evaluation and repair of hydraulic steel structures*, December.

U.S. National Research Council, 1983. *Safety of existing dams: evaluation and improvement*. National Academy Press, Washinton.

US Army Corps of Engineers - USACE, 2003. *Engineering and Design - Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures*, EM 1110-2-6051.

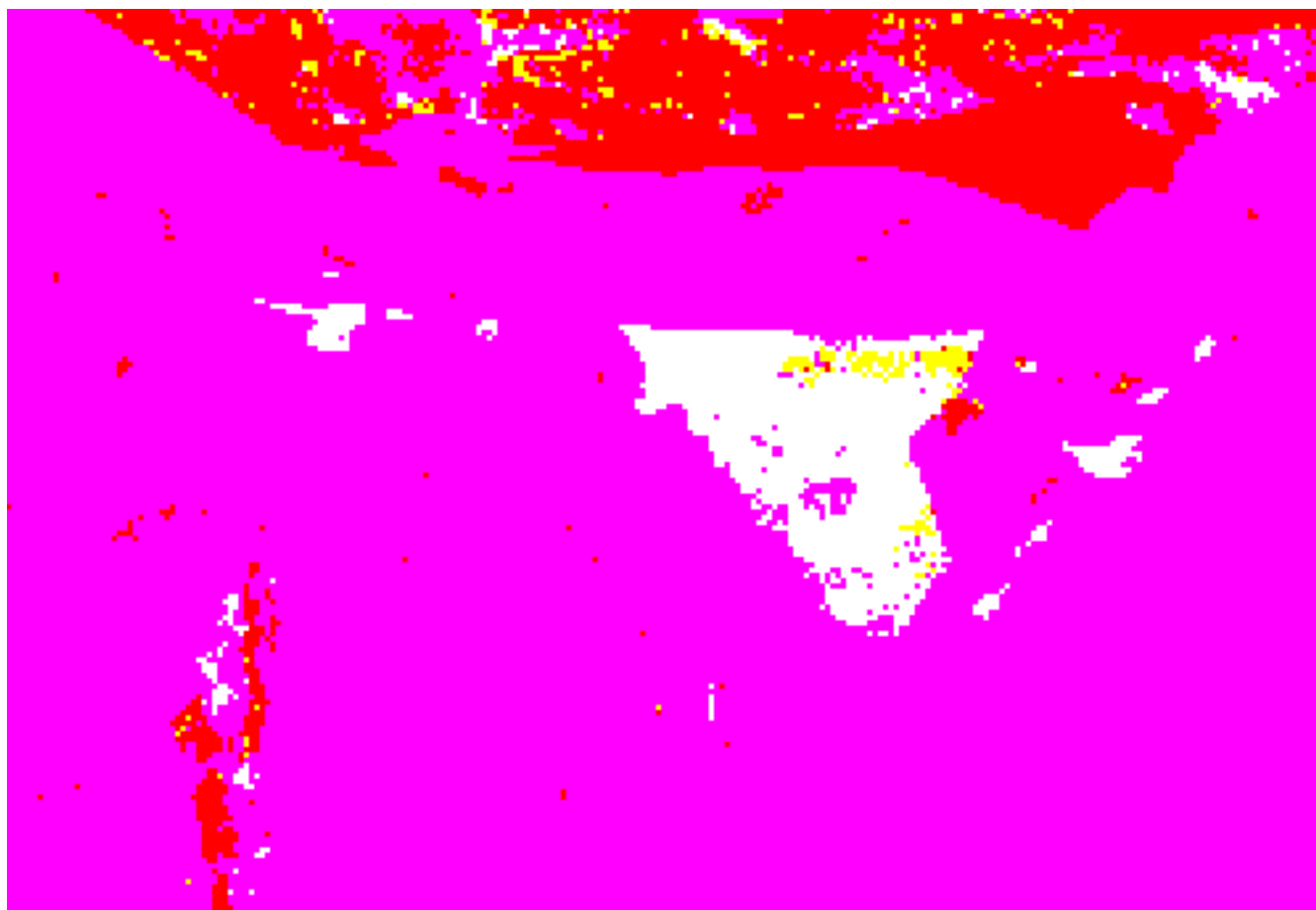
US Army Corps of Engineers - USACE, 2007. *Earthquake design and evaluation of concrete hydraulic structures*, EM 1110-2-6053.

Westergaard H.M., 1933. *Water pressure on dams during earthquakes*. Transactions ASCE, Vol. 98, 418-433.

Wieland M. & Ahlehagh S., 2017. *Seismic Safety Aspects of Gated Spillways of Large Storage Dams*, Long-Term Behaviour and Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies of Dams.

Wieland M., 2017. *Seismic aspects of safety relevant hydro-mechanical and electro-mechanical elements of large storage dams*, in proceedings of 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Prague, Czech Republic.





Diga di Vagli in provincia di Lucca. Foto di Alessandro Balsamo. 2° Concorso Fotografico ITCOLD.



Diga Mormanno in provincia di Cosenza. Foto di Gianni Termine. 1° Concorso Fotografico ITCOLD.