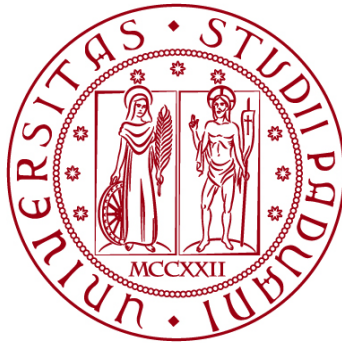


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE**

*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile



**TESI DI LAUREA**

**SFIORATORI DI SUPERFICIE: TIPOLOGIE E CRITERI  
DI DIMENSIONAMENTO**

**Relatore: Chiar.mo PROF. DANIELE PIETRO VIERO**

**Laureando: VALENTINA RIZZETTO**

**ANNO ACCADEMICO 2021-2022**

Alla mia famiglia.  
A tutti quelli che mi sostengono.  
A me stessa.



# SOMMARIO

INTRODUZIONE .....	5
1 DIGHE .....	7
1.1 Caratteristiche.....	7
1.2 Verifiche .....	10
1.3 Tipologie.....	12
1.4 Organismi di scarico dell'acqua .....	15
2 SFIORATORI DI SUPERFICIE .....	17
2.1 Definizione e principali caratteristiche .....	17
2.2 Componenti di uno sfioratore .....	19
2.3 Dimensionamento .....	21
2.4 Tipologie di sfioratori di superficie .....	27
2.5 Considerazioni sul coefficiente di deflusso per uno sfioratore sagomato 40	
3 DIGA DI RAVEDIS .....	43
3.1 Storia e caratteristiche generali.....	43
3.2 Considerazioni sugli idrogrammi di piena di progetto e reali.....	47
CONCLUSIONE.....	49
BIBLIOGRAFIA .....	51



## INTRODUZIONE

L'istinto di sopravvivenza è intrinseco all'uomo. Sin dall'antichità la necessità di coltivare i campi ha comportato una crescente richiesta di acqua. Ma le precipitazioni piovose o nevose non sono costanti, bensì molto variabili sia nella quantità che nella frequenza. Per questo motivo, l'uomo ha pensato di accumulare l'acqua, qualora eccedesse rispetto al bisogno: le dighe, in tal senso, svolgono una funzione fondamentale. Recentemente, dighe e opere di sbarramento sono costruite con lo scopo principale di laminare le piene dei corsi d'acqua, trattenendo temporaneamente parte del volume di piena in corrispondenza del colmo, per poi rilasciarlo a valle nelle fasi successive.

Lo scopo e le caratteristiche territoriali (la geologia e stratificazione del territorio, le condizioni ambientali e idrologiche) rendono necessaria la distinzione in diverse tipologie di dighe in termini di dimensione e geometria. Infatti, un terreno formato da roccia molto resistente avrà un comportamento sotto sforzo del tutto diverso rispetto a una roccia più tenera. Se gli strati del terreno sono formati da materiali poco permeabili come l'argilla, non si pone il problema della filtrazione dell'acqua, al contrario in terreni ghiaiosi e sabbiosi la questione della perdita d'acqua non è trascurabile. L'andamento del corpo della diga varia se la locazione è in pianura o in montagna e, in quest'ultimo caso, se le pareti di roccia sono vicine o distanti tra loro.

Le dighe sono articolate e comprendono molti elementi necessari affinché il funzionamento sia ottimale e duraturo nel tempo. Un elemento funzionale fondamentale per il corretto funzionamento delle dighe e per la sicurezza di tali opere è rappresentato dagli organi di scarico. In caso di piena, gli organi di scarico devono essere in grado di smaltire grandi quantità di acqua in condizioni di sicurezza. Gli scarichi sono distinti tra scarico di superficie, di mezzofondo, di fondo e di esaurimento. Storicamente è evidente che senza uno di questi elementi la vita di una

diga è limitata e termina in casi di piogge eccezionali o anche per modeste precipitazioni. Verrà approfondito in seguito il comportamento degli scarichi superficiali, tali elementi servono soprattutto per eliminare l'acqua in eccesso quando il volume massimo che il serbatoio può contenere raggiunge il limite. Le tipologie di scarico sono moltissime e in continua evoluzione, alla ricerca di una maggiore efficienza.

L'organizzazione della tesi vede una introduzione generale sulle dighe (Capitolo 1) e l'inquadramento di diversi tipi di organi di scarico (Capitolo 2). Nel Capitolo 3 è descritta la diga di Ravedis, sul torrente Cellina a Montereale Valcellina in provincia di Pordenone. Particolare attenzione è dedicata alla descrizione degli organi di scarico della diga di Ravedis, e in particolare degli sfioratori di superficie della tipologia denominata "a becco d'anatra".

# 1 DIGHE

## 1.1 Caratteristiche

La diga è un'opera utilizzata nell'ingegneria idraulica finalizzata a regolare o bloccare il deflusso dell'acqua. A livello normativo, viene definita come uno sbarramento alto almeno 15m e con un invaso almeno pari a 1 milione di m<sup>3</sup>. In antichità lo scopo principale della realizzazione di queste strutture era di accumulare acqua per irrigare i campi, nel corso del tempo le funzioni sono aumentate per produrre energia idroelettrica o per proteggere una parte di territorio da inondazioni.

Ci sono diversi studi da svolgere per poter progettare e costruire una diga. Come prima cosa è necessaria la redazione di un'indagine di tipo geologico per avere una conoscenza dell'ambiente che circonda l'ipotetica diga. Questo studio è basato su:

- Raccolta di documenti esistenti e di immagini aeree o ricavate dai satelliti;
- Rilevamenti sul terreno;
- Indagini dirette e indirette del sottosuolo.

Grazie a questo approfondimento, si è in grado di formulare un modello geologico di riferimento che raccoglie anche informazioni sull'organizzazione spaziale del terreno, su elementi strutturali, sulla storia geologica del sito e sulla genesi e caratteristiche fisiche delle varie tipologie di terreni.

In seguito, prima di progettare una diga, bisogna commissionare una relazione geotecnica. Essa comprende:

- Descrizione della stratigrafia della zona scelta per la costruzione dell'opera;
- Descrizione completa di ogni strato con cui è composto il terreno;



- Resistenza, permeabilità e deformabilità di ogni strato almeno fino alla profondità a cui è apprezzabile l'influenza dei carichi applicati dal corpo diga e dall'acqua;
- Collocazione e descrizione della falda, se presente.

Inoltre, se sono necessari trattamenti per migliorare le caratteristiche del terreno, è indispensabile svolgere prove per verificare l'efficacia di tali misure. Ci sono limitazioni alla costruzione di dighe se la zona è sismica, a questa relazione vanno aggiunti studi idrologici, cioè lo studio della distribuzione e circolazione dell'acqua superficiale e sotterranea, idrogeologici, in cui viene analizzato il movimento dell'acqua legato agli eventi meteorici e alle rocce, e sismotettonici, in cui vengono studiate le relazioni tra la tettonica e la sismicità di un'area.

Le dighe non possono essere costruite ovunque, infatti è di vitale importanza posizionare i serbatoi in corrispondenza di territori formati da terreni con bassa permeabilità, per evitare l'infiltrazione di acqua nel sottosuolo provocando cedimenti e catastrofiche conseguenze, come nel celebre caso del Vajont. È normale che la tenuta non sia perfetta e che ci siano delle perdite. Finché l'entità della fuoriuscita è molto inferiore rispetto alla capacità del serbatoio non ci sono problemi (di solito viene considerato un terreno impermeabile se la permeabilità è inferiore a  $10^{-9}$ m/s), ma se le perdite non sono più trascurabili la funzione di accumulo di acqua nel serbatoio viene meno e si dovranno cercare luoghi più adatti dove redigere la diga. Un esempio sono le ben quattro dighe di Puentes, costruite in Spagna nel 1648, tra il 1785 e 1791, tra il 1881 e il 1884 e tra il 1993 e il 2000. Il problema era che la diga poggiava su terreno alluvionale: dopo il crollo della prima diga a causa di un evento piovoso intenso è stata costruita la seconda diga molto vicina alla prima, anche in questo caso il terreno ha franato e in seguito, sempre nella stessa zona, è stata costruita la terza diga. Dopo un ulteriore cedimento, è stata costruita una quarta diga che attualmente non viene utilizzata ma ha un valore simbolico. È indispensabile che le fondamenta poggino su un buona roccia, altrimenti, in seguito a eventi piovosi, si genera nel terreno il sifonamento. Questo fenomeno avviene quando lo strato più superficiale del terreno,

costituito da materiali sciolti, diventa saturo d'acqua, la resistenza si annulla e, comportandosi come un liquido, viene trascinato verso valle.



Figura 1. Resti della seconda diga, la parte centrale mancante è stata trascinata via a causa del sifonamento del terreno (fonte: [www.dgdighe.mit.gov.it](http://www.dgdighe.mit.gov.it)).

La roccia dove viene costruito il corpo della diga deve essere resistente al carico che dovrà sopportare, costituito dal peso proprio della struttura e dalla spinta dell'acqua. I geologi, tramite varie prove specifiche e sondaggi, si occupano dello studio del terreno e della sua permeabilità. Un esempio antico emblematico è la diga di Alcantarilla, in Spagna, eretta dai Romani nel I secolo d.C. e crollata. Gli ingegneri dell'epoca avevano correttamente dimensionato la struttura formata da una parete in muratura e da un terrapieno in modo tale che resistesse alla spinta dell'acqua, il problema è che i costruttori avevano trascurato la spinta del terreno sulla parte in muratura in assenza di acqua, questo ha portato al ribaltamento della costruzione in muratura.

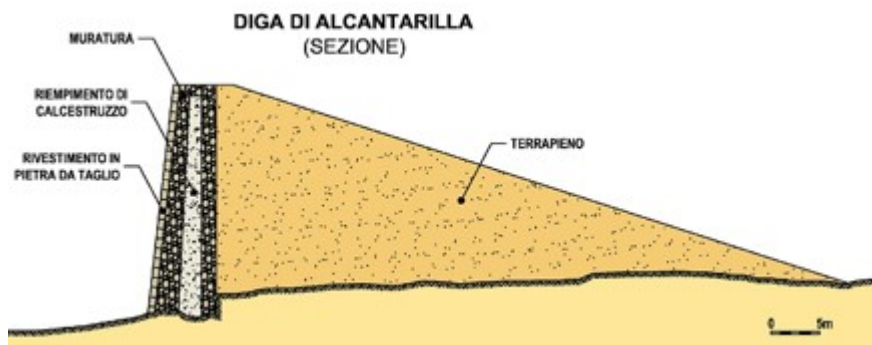


Figura 2. Sezione della diga di Alcantarilla (fonte: [www.dgdighe.mit.gov.it](http://www.dgdighe.mit.gov.it)).

È fondamentale installare registratori con trasmissione a distanza in corrispondenza della struttura e della fondazione per verificare il corretto comportamento dell'opera. In particolare è necessario il controllo di:

- elementi meteorici;
- livello del serbatoio;
- eventuali perdite di acqua all'interno della struttura e nel suo contorno;
- temperature interne ed esterne;
- pressione dell'acqua;
- deformazioni e spostamenti della struttura e del terreno d'appoggio;
- eventuali fenomeni sismici se la diga è collocata in zone sismiche.

Durante la fase di costruzione, è necessario deviare i corsi d'acqua e sistemi per lo scarico dell'acqua devono essere presenti, funzionanti e dimensionati per una portata di piena di progetto in modo da garantire sicurezza ai territori in caso di pericolo. In particolare, si considera un tempo di ritorno di 1000 anni per le dighe in calcestruzzo e di 3000 anni per quelle costituite da materiale sciolto.

La portata di piena viene valutata in modo probabilistico, sfruttando informazioni pluviometriche e idrometriche relative a un bacino idrografico sotteso alla sezione dello sbarramento. Nel caso in cui le informazioni siano limitate, si usano dati di bacini limitrofi che hanno caratteristiche simili a quello in studio.

## 1.2 Verifiche

Prima della messa in funzione della diga, è necessario eseguire verifiche per garantire la sicurezza necessaria all'opera. Nel caso in cui non ci sia rischio sismico, basta considerare lo stato limite di esercizio (SLE), cioè deformazioni o danneggiamenti della costruzione che non compromettono l'utilizzo dell'opera, e lo stato limite ultimo (SLU), dove si raggiungono deformazioni, spostamenti o danneggiamenti oltre i quali la vita della struttura è compromessa.

Le azioni da considerare per svolgere le verifiche in modo completo sono:

- Peso proprio della struttura. È dato dallo sbarramento e dalle opere accessorie presenti;

- Spinta idrostatica dell'acqua;
- Coazioni originate da effetti termici o da ritiro;
- Sottospinte dovute a pressioni interstiziali;
- Spinta del ghiaccio;
- Spinta per l'interrimento.

Le verifiche da svolgere per lo stato limite di esercizio sono:

1. Eccesso di tensioni o deformazioni del corpo della diga o dei terreni di fondazione;
2. Danneggiamenti degli organi di scarico;
3. Danneggiamento delle opere di derivazione;
4. Danneggiamento dei sistemi di misura e controllo.

Le verifiche da svolgere per lo stato limite ultimo sono:

1. Instabilità del corpo della diga o dei terreni circostanti;
2. Instabilità per scorrimento del corpo della diga;
3. Rottura a causa di erosioni interne; fessurazioni della diga, del materiale di fondazione o degli elementi di tenuta tali per cui si ha una filtrazione incontrollata;
4. Deformazioni del corpo diga o dei terreni di fondazione che causano danni alla parte di sbarramento o tracimazione;
5. Instabilità dei pendii che provocano danni strutturali;
6. Danneggiamento o rottura degli organi di scarico tali per cui il deflusso controllato è impedito;
7. Condizioni di piena che portano alla tracimazione del coronamento e all'eventuale collasso dello sbarramento.

Le verifiche sono necessarie e da svolgere con continuità per garantire il funzionamento della struttura nella sua interezza e nei singoli elementi che lo compongono. Esse devono essere svolte anche in fase di costruzione, in modo da aggiornare i modelli geologici, geotecnici, idrologici e idraulici, se necessario.

Gli strumenti di misura registrano dati relativi a:

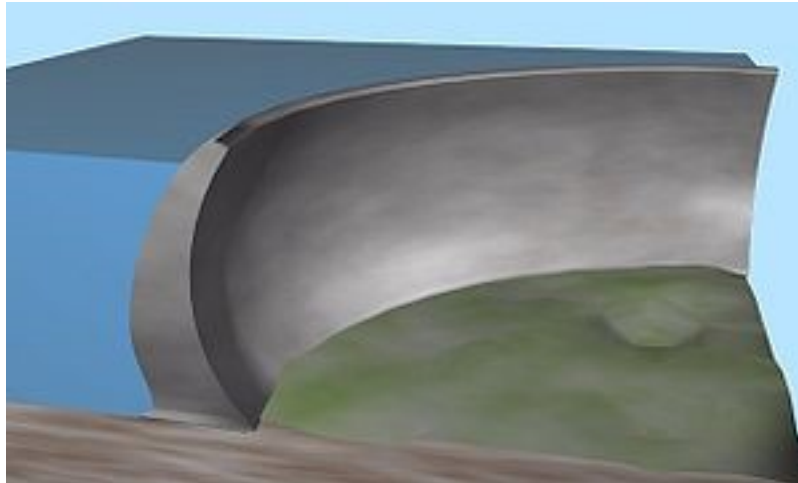
- Grandezze meteorologiche;

- Livello del serbatoio e delle eventuali falde a valle;
- Portate e volumi scaricati;
- Perdite di acqua sia nella struttura che ai suoi margini;
- Temperature interne ed esterne;
- Pressioni per il controllo della filtrazione dovuta all'invaso;
- Tensioni;
- Deformazioni e spostamenti della struttura, del terreno di fondazione e di eventuali aree instabili;
- Eventuali eventi sismici.

### 1.3 Tipologie

In base all'aspetto geologico, idrologico, idraulico e geotecnico del terreno e sulla disponibilità di materiali da costruzione, si distinguono le seguenti tipologie di dighe:

- Ad arco. Viene sfruttata la curvatura longitudinale della struttura muraria per contrastare la spinta dell'acqua. Sono molto utilizzate e formate da calcestruzzo il cui spessore è ridotto. Il profilo della diga è arcuato, necessario per scaricare le forze e la spinta dell'acqua alla roccia presente ai lati della struttura e non alla parte inferiore del corpo della diga. Sono molto complesse da progettare perché si devono considerare un gran numero di variabili, ad esempio è di vitale importanza scegliere la locazione della diga in modo tale che la roccia presente ai lati abbia adeguata resistenza per sopportare le spinte derivanti dal muro e che la larghezza della gola sia di dimensione ridotta. Il raggio dell'opera deve essere limitato e la cupola dimensionata in modo che non venga sottratto troppo spazio utile al serbatoio. La forma e la curvatura della costruzione variano in base a ogni specifica condizione e in molti casi il dimensionamento viene svolto cercando di ottimizzare i costi;



*Figura 3. Schema di una diga ad arco (fonte: [www.wikiwand.com](http://www.wikiwand.com)).*

- A gravità. La spinta dell'acqua viene contrastata dal peso proprio della struttura, l'asse della diga è rettilineo o con una debole curvatura. Il corpo è costituito da calcestruzzo e lo spessore del muro diminuisce all'aumentare dell'altezza. Si distinguono due tipologie: in gravità ordinaria o alleggerita. Le principali differenze tra le due sono lo spessore del corpo della diga, quindi la quantità di calcestruzzo da utilizzare, e la variazione di altezza dell'opera che può essere realizzata. È preferibile che il piano d'appoggio, dato che deve sopportare notevoli sollecitazioni, sia formato da roccia compatta per garantire stabilità.

Spesso vengono costruite dighe a gravità ma con forma ad arco, come nel celebre caso della diga di Hoover situata nello stato del Nevada negli Stati Uniti d'America. L'utilizzo viene reso necessario quando le pareti laterali hanno buoni ma non ottimali requisiti di stabilità e compattezza. In questo sotto caso la spinta dell'acqua in parte è assorbita dalle pareti laterali e in parte dal peso proprio del corpo diga;

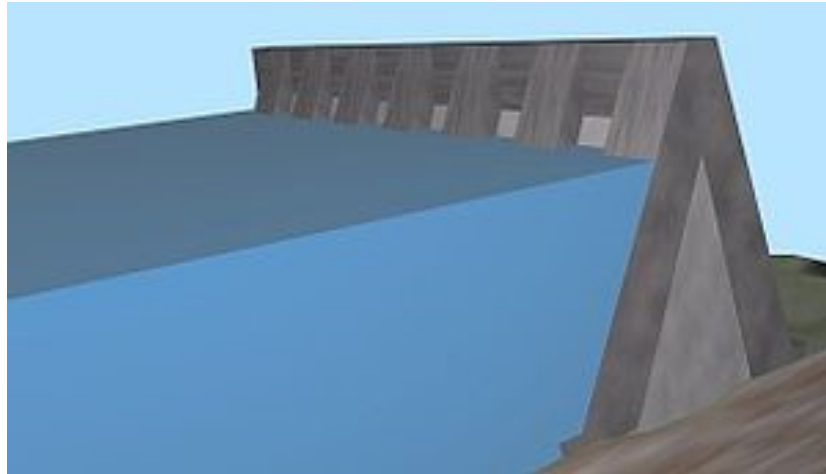


Figura 4. Schema di una diga a gravità (fonte: [www.wikiwand.com](http://www.wikiwand.com)).



Figura 5. Diga di Hoover (fonte: [www.it.wikipedia.org](http://www.it.wikipedia.org)).

- Formate da materiale sciolto. Vengono scelte quando il terreno non è roccioso. La costruzione viene esclusa quando, dopo studi geotecnici, si evidenzia la presenza di terreni che possono liquefare con facilità o se ci sono argille impossibili da consolidare in modo efficace e duraturo. Si distinguono in base al materiale utilizzato per la costruzione: terra, muratura a secco o pietre. Spesso l'interno o il rivestimento è costituito da opportuni materiali a bassa permeabilità e in grado di irrigidire la struttura. È buona norma rendere omogenea la struttura con il piano di fondazione e costruire la struttura in

modo che il corpo della diga abbia forma trapezoidale. La resistenza per contrastare la spinta dell'acqua è data dal peso del terreno. Sono le meno costose e le più semplici da costruire a livello ingegneristico e pratico dato che è sufficiente accumulare materiale. Tra le tipologie di dighe illustrate, sono quelle che raggiungono le altezze minori. Inoltre bisogna sempre tenere conto dei cedimenti del terreno, del rilevato e in seguito ad azioni sismiche, dopo il termine della costruzione.



*Figura 6. Esempio di diga formata da materiali sciolti a Villacidro (Sud Sardegna) (fonte: [www.enas.sardegna.it](http://www.enas.sardegna.it)).*

#### 1.4 Organismi di scarico dell'acqua

È indispensabile, per la durata di funzionamento dell'opera, che le dighe siano dotate di organismi di scarico. Infatti, nei casi in cui gli scarichi sono stati progettati in modo sbagliato o nei casi in cui risultano assenti, il risultato è stato il cedimento della diga a seguito di precipitazioni modeste rispetto al calcolo teorico svolto dagli ingegneri in fase di progettazione. Un esempio è la diga di South Fork, costruita nello stato della Pennsylvania negli USA a fine '800 e crollata dopo una piccola pioggia perché gli sfioratori superficiali erano stati bloccati per non alterare la flora del bacino d'acqua. Il risultato è stato la morte di migliaia di persone di un paese attiguo la struttura.

La distinzione si basa sulla collocazione degli scarichi all'interno della diga e quindi sulla loro funzione. Esistono le seguenti tipologie:



1. Scarichi di superficie. Sono indispensabili per allontanare volumi di acqua che superano il livello prefissato, come nel caso di eventi meteorici eccezionali e per mantenere il livello costante. Possono essere sia liberi che regolati da sistemi mobili come le paratoie;
2. Scarichi di mezzofondo. Sono presenti in dighe con sbarramenti alti almeno 50m o che invasano almeno 50Mm<sup>3</sup>. Sono utili nel caso in cui sia necessario far variare il livello dell'acqua all'interno del serbatoio e per ottenere una maggiore affidabilità durante lo svuotamento della diga. Si aprono con facilità e non c'è il rischio dell'accumulo di materiali estranei;
3. Scarichi di fondo. Formati da condotte posizionate nella parte inferiore del serbatoio e servono per evacuare tutta l'acqua presente in tempi molto brevi, per questo motivo i diametri delle tubazioni sono elevati. Inoltre sono essenziali per eventuali manutenzioni e per permettere la rimozione di materiali accumulati nel tempo, che impediscono il corretto deflusso dell'acqua;
4. Scarichi di esaurimento. Presenti se lo scarico di fondo è collocato a una quota superiore rispetto al fondo dell'alveo e servono per il completo svuotamento del serbatoio. Sono necessarie griglie per evitare che i materiali depositati impediscano l'entrata delle acque.

## 2 SFIORATORI DI SUPERFICIE

### 2.1 Definizione e principali caratteristiche

Gli sfioratori di superficie sono organi di scarico di geometria variabile costruiti con calcestruzzo o, in casi particolari, con roccia e adoperati per limitare l'altezza della colonna d'acqua oltre un certo livello, stabilito in fase di progettazione. Il loro impiego è frequente e usato in ambiti diversi, dai serbatoi collocati nella rete acquedottistica alle dighe.

Nel settore delle dighe gli sfioratori di superficie sono fondamentali. Servono per:

- Smaltire la portata d'acqua che supera la quota di massima regolazione, cioè il limite oltre il quale inizia lo sfioro delle portate considerate eccedenti e garantendo il livello costante;
- Svuotare il serbatoio creato dalla diga;
- Incanalare l'acqua per usi particolari, ad esempio per permettere il funzionamento di centrali idroelettriche o consentire l'uso irriguo.

La tipologia di sfioratore dipende soprattutto dalla modalità di deflusso e dalle portate potenziali in caso di eventi eccezionali. Inoltre, gli sfioratori di superficie devono essere dimensionati in modo da non superare la quota di massimo invaso, cioè il livello limite che raggiunge l'acqua durante l'evento di piena più gravoso. Tale evento viene definito dal Tempo di Ritorno che per le dighe è dell'ordine delle migliaia di anni. L'inizio dello sfioro avviene nel momento in cui la quota massima di regolazione, definita durante la progettazione, viene superata.

Per volume di laminazione si intende la parte di capacità del serbatoio compresa tra la quota di massimo invaso e il livello più basso dei dispositivi di scarico. Il franco è il dislivello tra la quota di massimo coronamento, che è la parte più alta della diga, e quella di massimo invaso. L'altezza di massima ritenuta è il dislivello tra la quota di

massimo invaso e quella del punto più depresso dell'alveo naturale in corrispondenza del paramento di monte. Il volume totale d'invaso è la capacità del serbatoio tra la quota di massimo invaso e la quota minima di fondazione. Il volume utile di regolazione è compreso tra la quota minima di regolazione e la quota minima del livello d'acqua alla quale può essere derivata.

Gli sfioratori hanno forme diverse in base alle portate di acqua e allo spazio disponibile per la costruzione dello stramazzo. La forma classica è quella rettilinea, se lo spazio è ridotto si accresce la portata sfiorante aumentando il perimetro di sfioro tramite sfioratori a labirinto o a becco d'anatra. Inoltre, si distinguono gli sfioratori fissi e mobili. Nel primo caso l'acqua raggiunge il livello prestabilito e scende in automatico; nel secondo caso l'acqua supera la quota sfiorante e gli organismi mobili si aprono solo nel momento in cui viene superato un livello maggiore, prefissato. Quando la quota scende sotto il valore dato, le paratoie si chiudono in modo automatico.

Generalmente gli sfioratori sono posti ai lati della diga o, se la morfologia del territorio non consente la presenza di sfioratori laterali, viene usata la struttura a calice. In ogni caso sono separati dal corpo principale.

Servono disposizioni speciali per evitare la fessurazione del calcestruzzo che potrebbe provocare perdite. È buona norma aumentare lo spessore, usare più armatura in acciaio, utilizzare drenaggi, effettuare un precarico e proteggere le zone delicate.

Il dimensionamento degli scarichi di superficie deve essere svolto in modo che il franco netto, cioè il *“dislivello tra la quota del piano di coronamento e quella di massimo invaso, aggiunta a questa la semiampiezza della massima onda prevedibile nel serbatoio”* ([www.dgdighe.mit.gov.it](http://www.dgdighe.mit.gov.it)), sia almeno superiore a 1m per le dighe in calcestruzzo e almeno pari a 1,5m per le dighe costituite da materiali sciolti. È necessaria la valutazione del tempo di ritorno per cui il franco netto viene annullato.

Un'altra considerazione riguarda la collocazione del canale di allontanamento dell'acqua scaricata. Il collettore deve essere rettilineo per evitare un moto ondulatorio dentro la condotta e ci deve essere un raccordo consono durante la fase di immissione dell'acqua in eccesso nel corso d'acqua a valle.

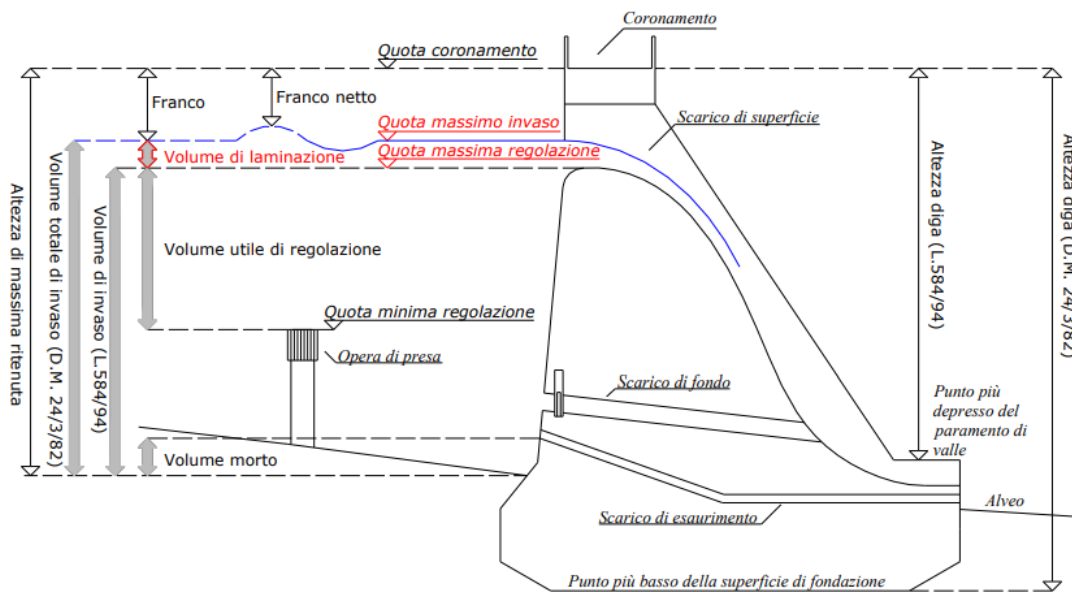


Figura 7. Elementi principali (fonte: [www.dgdighe.mit.gov.it](http://www.dgdighe.mit.gov.it)).

Formula generica per la portata sfiorante:

$$Q = C_q \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Dove:

- $C_q$  è il coefficiente di flusso, sempre inferiore a 1 e variabile in base alla tipologia di sfioratore;
- $A$  è l'area dello sfioratore che varia al variare della geometria della soglia sfiorata (rettilineo, cilindrico);
- $h$  è il carico posto sulla soglia.

## 2.2 Componenti di uno sfioratore

Lo sfioratore è costituito da:

- a. Struttura di controllo. È la parte principale di uno stramazzo dal momento che regola il deflusso dal serbatoio, limitando o impedendo il getto al di sotto di un prefissato livello di tirante di acqua. Può essere formata da una soglia, uno stramazzo, un orifizio o una condotta. Forma e dimensione sono variabili in base a ogni caso specifico. La cresta dello stramazzo può essere rettilinea, curva, semicircolare o a U. La parte più alta dell'opera può essere sagomata, larga, stretta o in casi particolari la sezione trasversale è variabile. Gli orifizi di

controllo sono orizzontali, verticali o inclinati. Possono essere taglienti, con bordo arrotondato o a forma di campana; in alcuni casi viene posizionato anche lo scarico con un getto contratto o strozzato. Inoltre, lo scarico è di diverso tipo: libero, solo in parte libero o totalmente sommerso. La tipologia di condotte è orizzontale, verticale, inclinata e rettilinea o curva. Le tubature scaricano con un efflusso libero se il tirante è basso, oppure in parte o per tutta la lunghezza se lo scarico è effettuato a moto uniforme o variabile. Il controllo è posto tra l'ingresso dell'acqua e l'estremità a valle.

- b. Canale di scarico. La portata derivante dalla struttura di controllo viene convogliata in un corso d'acqua sottostante la diga tramite un canale di scarico. In alcuni casi il canale non è necessario, ad esempio quando l'acqua precipita liberamente dalla cresta della diga. La struttura di convoglio si pone a valle della diga, in un canale aperto scavato lungo il terreno o in una condotta costruita sotto o all'interno della diga. La sezione trasversale del canale di scarico di solito è rettangolare, trapezoidale o circolare e può essere visibile o nascosta. La lunghezza è limitata o elevata. La dimensione varia in funzione delle esigenze idrauliche e il profilo dipende dalla geologia e topologia del territorio. Ad esempio, si distinguono canali aperti scavati seguendo la superficie del terreno o canali chiusi. I canali aperti sono dritti o curvi; i lati possono essere paralleli, convergenti, divergenti o una loro combinazione. Invece i canali chiusi sono formati da una condotta verticale o inclinata che si allaccia a un tunnel orizzontale. In casi particolari vengono utilizzati accostamenti di canali aperti e chiusi. I canali di scarico devono resistere alla forza dell'acqua causata dall'alta velocità e per questo vengono rivestiti con appositi materiali.
- c. Struttura terminale. È importante considerare l'azione dell'energia cinetica dovuta alla discesa dell'acqua dal serbatoio poiché le alte velocità della corrente possono portare all'erosione del piede della diga. In alcuni casi lo scarico a velocità sostenute avviene direttamente nel torrente e l'energia cinetica viene assorbita dal letto del corso d'acqua. Per proteggere il getto a

valle ed evitare l'erosione del torrente nel punto di contatto dello sbocco, si può aprire il getto a ventaglio con appositi diffusori. Se il getto è molto forte, si può anticipare l'urto scavando una vasca, oppure si può dissipare l'energia cinetica con salti idraulici. Non ci sono criteri specifici per il dimensionamento del bacino, ma varia da situazione a situazione ed è possibile aggiungere il lago artificiale anche in un momento successivo.

- d. Canali di entrata e uscita. Non vengono costruiti dove è presente uno stramazzo che preleva direttamente la portata dal serbatoio e la trasferisce al fiume. La velocità di entrata è limitata, i canali di transizione sono progettati in modo graduale per minimizzare la perdita di carico e ottenere un flusso omogeneo. Infatti gli effetti di un flusso e di un ingresso irregolare possono persistere in tutto il tratto e portare all'erosione dei canali a valle o a uno scarico di portata inferiore. La velocità d'ingresso e la profondità influiscono in modo rilevante nella determinazione del coefficiente di scarico: fissato il coefficiente di scarico e se nel tratto iniziale la profondità è rilevante, allora l'altezza del tirante è ridotta. I canali di uscita convogliano il flusso dello stramazzo dalla struttura terminale a un canale posto sotto la diga. Anche se sono presenti dispositivi di calma, è complesso ridurre la velocità al di sotto della velocità di scorrimento del fiume in condizioni normali. Inoltre si ha una graduale degradazione del letto del fiume dato che l'acqua che scende dallo stramazzo è depurata da materiale granulare.

## 2.3 Dimensionamento

L'idrogramma rappresenta la variazione di portata in funzione del tempo. L'area sottesa alla curva rappresenta il volume di acqua che fluisce nel serbatoio.

Per il dimensionamento di una struttura idraulica e soprattutto dei suoi scarichi è fondamentale partire da un evento passato molto gravoso che, se si ripresenta, grazie all'intervento svolto, l'intensità viene diminuita. È importante conoscere gli idrogrammi di piena, che in generale descrivono un rapido aumento della portata e una sua lenta diminuzione. Questo grafico è costituito da una curva di concentrazione,

in cui la portata aumenta fino al raggiungimento del colmo, punto di massimo. In seguito è presente il ramo di esaurimento in cui la portata diminuisce in modo progressivo ma molto lento. Dato che in un anno ci sono diversi eventi di piena con importanza diversa, è importante conoscere i dati di ogni anno e isolare i periodi di maggiore interesse.

Dalla figura 8 si osserva che, a parità di volume invasato, la laminazione ottimale avviene quando si regolano gli scarichi in modo che l'idrogramma di piena coincida con la portata in uscita nella parte iniziale, in seguito si ha una fuoriuscita di portata costante durante il periodo di colmo dell'evento di piena, per poi avere una diminuzione di portata uscente, sempre maggiore rispetto la portata entrante, fino al termine dell'evento.

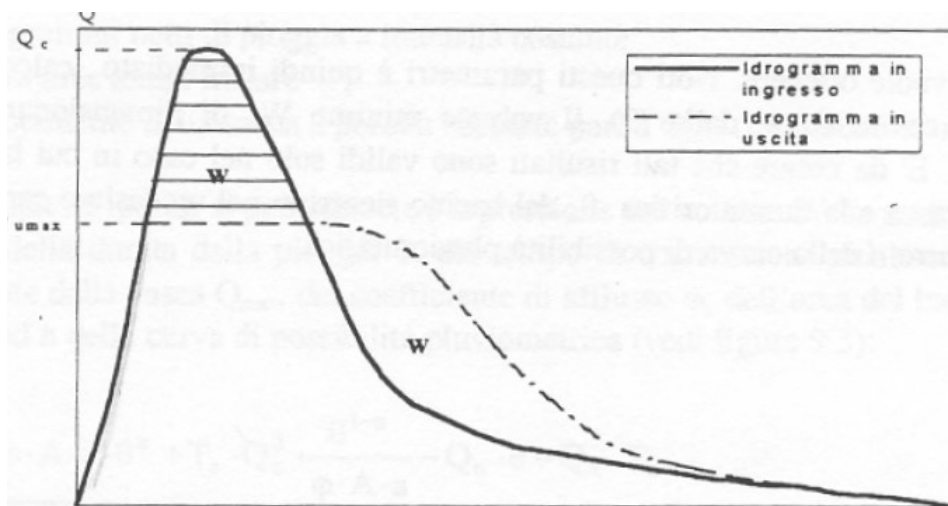


Figura 8. Effetto di laminazione ottimale.

Il serbatoio di una diga serve anche per laminare le piene, cioè per attenuare il colmo di piena man mano che il fenomeno prosegue verso valle, è un elemento molto importante e il dimensionamento corretto è fondamentale. La sua funzione è quella di diminuire la portata in arrivo per renderla compatibile con la capacità di rilascio. In questo modo, la durata della piena aumenta ma la potenza decresce. In ogni caso, quello che entra, deve uscire ma lo fa in modo distribuito e non istantaneo. I serbatoi vengono collocati a monte delle zone da proteggere in modo tale da invasare la maggior quantità di acqua di piena possibile.

Per il corretto dimensionamento, è fondamentale conoscere la portata di colmo della piena e soprattutto il volume di piena. Infatti, per volumi uguali, l'andamento nell'idrogramma può avere caratteristiche diverse in base alla collocazione del picco.

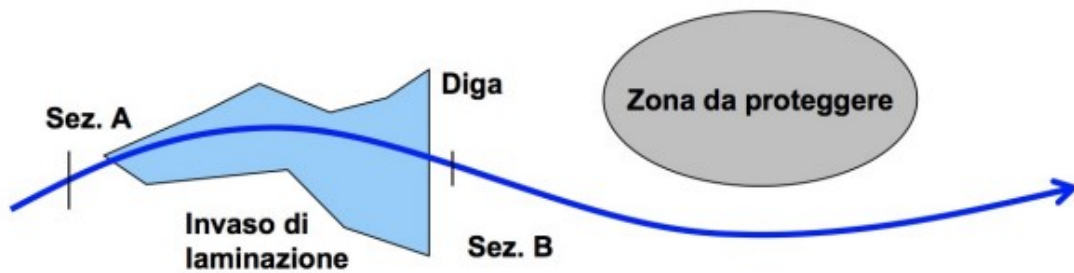


Figura 9. Schema collocazione invaso di laminazione.

Per il dimensionamento serve studiare un compromesso tra l'impatto ambientale e socio-economico, la massimizzazione del potere regolatore del serbatoio e le condizioni geologiche e topografiche della zona scelta. Il primo passo è definire l'idrogramma di piena di progetto. Si esegue una composizione tra volume invasato e sistemi adeguati per il rilascio delle portate. In seguito si ottiene una stima della modulazione della piena. L'invaso viene reso possibile mediante la creazione di una diga, dotata di scarichi di fondo per restituire al corso d'acqua una parte delle portate invasate e di superficie se le luci di fondo hanno problemi nel funzionamento o se termina la capacità del serbatoio.

Ci sono due formule che vengono considerate quando si svolge il regolare la laminazione di piena:

1. Equazione di continuità dell'invaso:

- $Q(t)_e - Q(t)_f - Q(t)_s = \frac{dW(t)}{dt}$

2. Equazione di continuità delle portate in alveo:

- $Q(t) = Q(t)_a - Q(t)_e + Q(t)_f + Q(t)_s$

- Dove:

- $Q(t)_e$  è la portata entrante nell'invaso;

- $Q(t)_f$  è la portata scaricata dal fondo dell'invaso;



- $Q(t)_s$  è la portata sfiorata dall'invaso;
- $W(t)$  è il volume accumulato dall'invaso.

Si definisce un comportamento ideale in modo tale che il comportamento reale sia in grado di approssimarlo il più possibile.

Inoltre esistono due tipi di laminazione: statica e dinamica. Nel primo caso, al fine di evitare lo scarico d'acqua a valle durante l'evento di piena, si mantiene sempre un determinato volume di invaso disponibile; nel secondo caso vengono sfruttate le previsioni metereologiche per prevedere il volume in arrivo, in modo da avere già a disposizione il volume di invaso necessario per la laminazione.

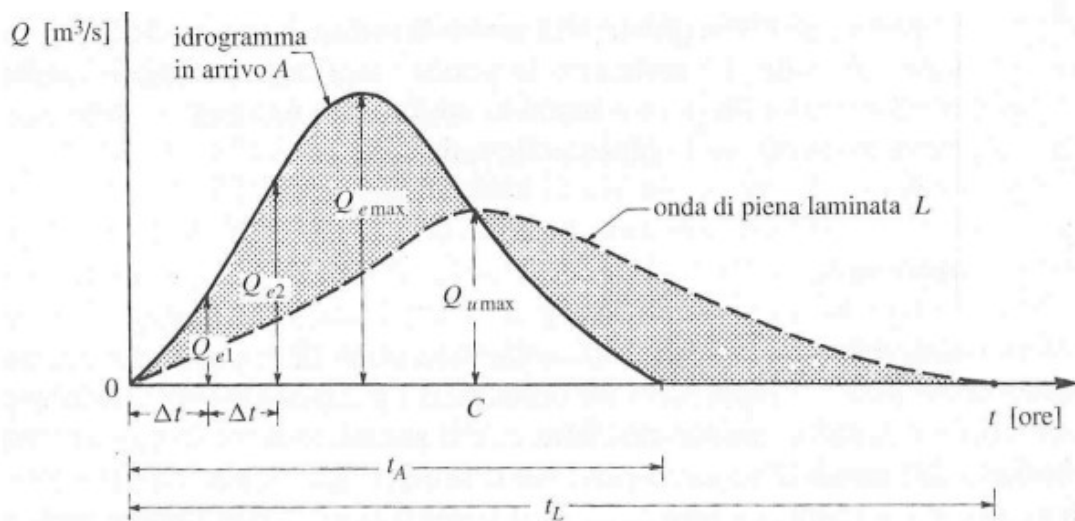


Figura 10. Portata invasata e portata laminata.

Un'alternativa per la laminazione delle piene è l'utilizzo di casse di espansione. Sono preferibili ai serbatoi perché meno impattanti sul territorio. In questo caso, a differenza del serbatoio che sbarrava sempre un corso d'acqua, si può collocare anche a lato di un fiume ed entra in funzione solo durante l'evento di piena. Serve per allargare le zone in corrispondenza dei corsi d'acqua per riuscire a contenere i volumi in arrivo e restituirli quando il livello del fiume raggiunge altezze non più ritenute pericolose.

Ci sono due tipi di casse d'espansione in base alla loro collocazione: all'interno dell'alveo del fiume e in derivazione. Nel primo caso si sfrutta una strettoia preceduta da un allargamento e basta costruire uno sbarramento che rende possibile il

riempimento dell'invaso e anche il deflusso nelle normali condizioni, grazie ai corretti organi di scarico. È la soluzione meno costosa e quella con minori vincoli idraulici ma con efficienza minore. È presente una sezione di controllo inserita all'interno del corpo dell'opera di regolazione e posta direttamente sul corso d'acqua. Il dimensionamento viene studiato in modo che il deflusso avviene nei casi di piena ordinaria.

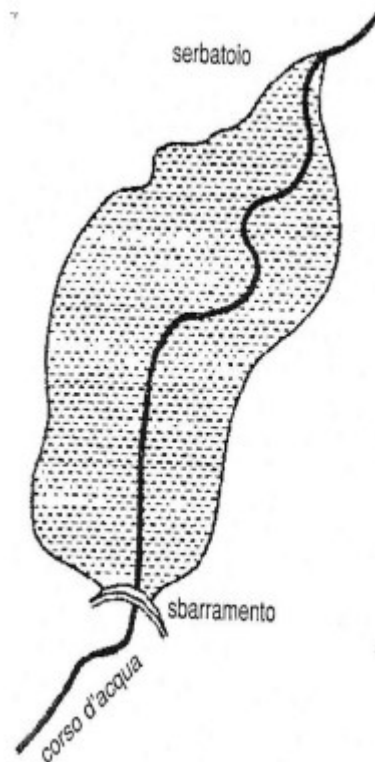


Figura 11. Cassa d'espansione in linea.

Nella seconda tipologia l'ingresso dell'acqua è regolato da un'opera di presa e l'uscita regolata da sfioratori appositi. In questo caso il tirante d'acqua è limitato e se la pendenza del terreno è elevata, è conveniente porre vasche in serie dotate di luce di fondo e soglia sfiorante. La cassa di derivazione si attiva nel momento in cui le soglie tracimabili entrano in funzione, sono poste a un'altezza pari o leggermente inferiore al livello limite. La laminazione è più efficace rispetto al caso in linea perché il livello in uscita non ha il volume invasato all'inizio della piena anche se la progettazione è più complessa.

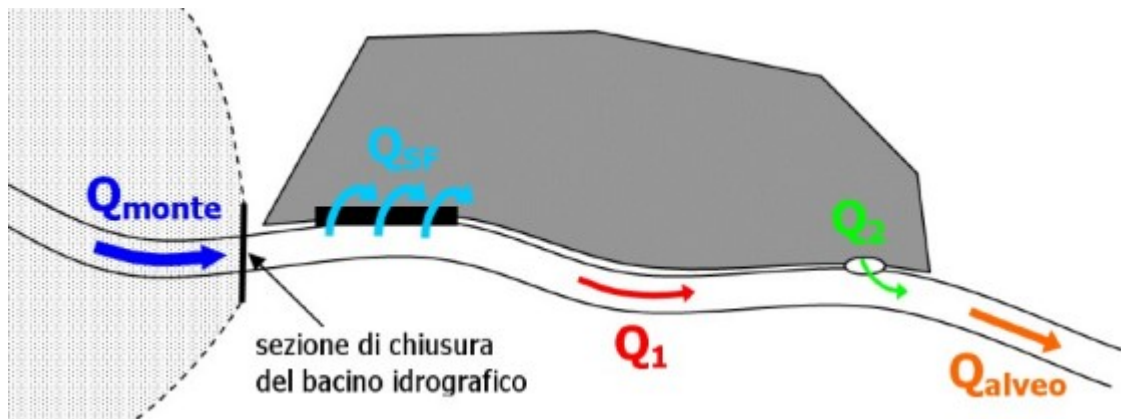


Figura 12. Cassa d'espansione in derivazione.

Le funzioni delle casse di espansione non si limitano alla laminazione, ma servono anche per aumentare le portate dell'irrigazione, aumentare il deflusso minimo e per rimodulare le portate dei fiumi, sfasate a causa di impianti idroelettrici.

Inoltre, dato che le acque di piena contengono molti detriti, questi si depositano in corrispondenza degli scarichi e c'è il rischio di intasamento, per questo motivo sono necessari controlli periodici. Sono costituite da un'arginatura in terra e coperte da elementi erbacei per evitare filtrazione e sifonamento.

Le equazioni usate per il dimensionamento delle casse di espansione sono:

1. Equazione di continuità:  $q_e - q_u = \frac{dW}{dt}$

Dove:

- $q_e$  = portata entrante;
- $q_u$  = portata uscente;
- $W$  = volume invasato.

2. Equazione d'efflusso:  $q_u = c \cdot h^\beta$

Con  $\beta$  pari a 0.5 o 1.5 in base all'efflusso a battente o a stramazzo.

3. Curva dei volumi d'invaso:  $W = W_1 \cdot h^n$

Dove:

- $W$  = volume invasato sopra la luce di efflusso;
- $W_1$  = volume invasato a un'altezza di 1m dalla luce;
- $n=1/4,5$  in base alla geometria dell'area da allargare.

## 2.4 Tipologie di sfioratori di superficie

In base alle esigenze morfologiche del territorio si progettano gli sfioratori di superficie. Ce ne sono di svariate gamme e, inoltre, molti studi cercano di ottimizzare il loro funzionamento. Si possono distinguere le divisioni principali:

1. Soglia sfiorante;
2. Sfioratori a canale laterale;
3. Sfioratori a calice;
4. Sfioratore a sifone;
5. Sfioratori a labirinto;
6. Sfioratori mobili.

1. Soglia sfiorante. La peculiarità è la soglia a pianta rettilinea. Le soglie sfioranti hanno diverse varietà in base al modo in cui l'acqua defluisce e alla geometria dello stramazzo. Si identificano due tipologie principali: a caduta libera e gli sfioratori sagomati tipo Creager-Scimeni.

- i. Nel primo caso lo sbarramento ha un'altezza ridotta e la faccia a valle è praticamente verticale. Nel momento in cui il livello dell'acqua supera la quota di massima regolazione, l'acqua scende liberamente. Serve prestare attenzione al rischio di abrasione a valle dello sfioratore per cui di solito è posto un piccolo bacino artificiale, dimensionato in base all'altezza di caduta e alla portata di scarico, dotato di un riparo ed è collocata anche una piccola diga secondaria di dimensione inferiore. È necessaria un'appropriata ventilazione durante lo sfioro per evitare effetti di fluttuazione e depressione. Questa tipologia di sfioratori è utilizzata soprattutto per piccole dighe ad arco o dighe formate da materiale sciolto. In questo caso il coefficiente di flusso vale circa

$$C_q = 0,41$$

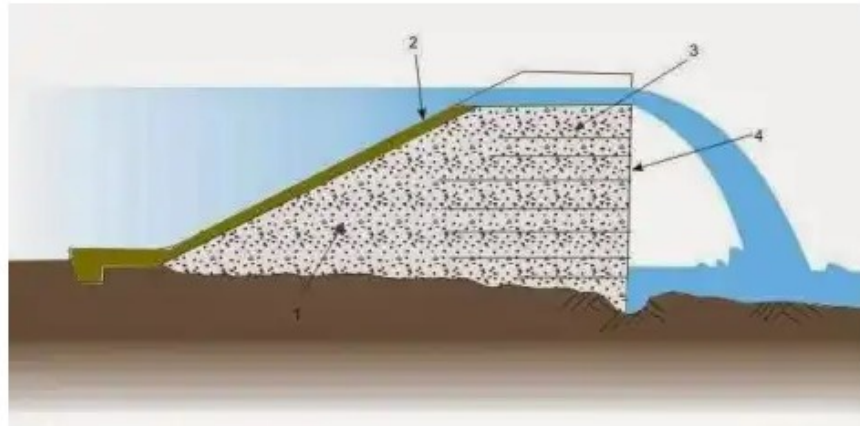


Figura 13. Schema di uno sfioratore a caduta libera (fonte: [www.theconstructor.org](http://www.theconstructor.org)).



Figura 14. Esempio di scarico a caduta libera, diga di Ridracoli (Forlì) (fonte: [www.dgdighe.mit.gov.it](http://www.dgdighe.mit.gov.it)).

- ii. Nel secondo caso lo sfioratore è sagomato in modo tale che la parte sfiorata sia a contatto con la vena in calcestruzzo e in mezzo non ci sia aria che rischia di creare una zona di attacco e stacco dell'acqua sul basamento. La pendenza tra il livello a monte e a valle della diga è elevata e l'acqua fluisce velocemente. Viene utilizzato nel caso in cui la larghezza del fiume a valle è limitata. La curva superiore è ampia, lungo la superficie di contatto le pressioni sono positive. Nel caso di curve più nette, l'acqua tende ad allontanarsi dalla parete producendo una pressione negativa lungo il muro di contatto che aumenta la testa

effettiva e aumenta la capacità di scarico. Viene usata per dighe a gravità in calcestruzzo come unica tipologia di sfioratore presente. Per altri tipi di dighe può essere sfruttata come struttura di controllo o accoppiata con altre varietà di stramazzi. Il coefficiente di deflusso è circa pari a  $C_q = 0,52$ .

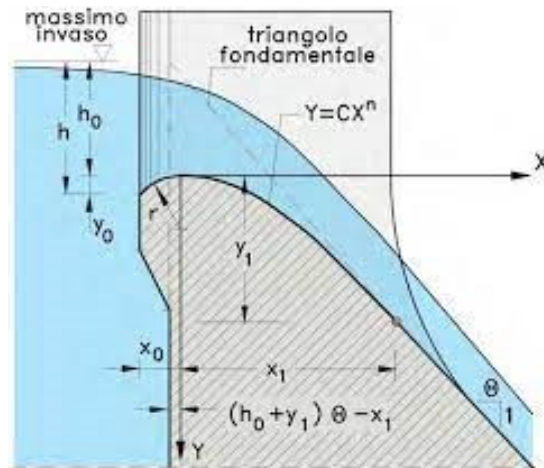


Figura 14. Schema di uno sfioratore Creager-Scimeni.

2. Sfiatori a canale laterale. Questa tipologia di sfiatori è simile a quella sagomata ma sono collocati ai lati della diga, quando la parte centrale non è abbastanza larga. L'acqua che sfiora cade in una condotta aperta che ruota di 90 gradi e continua nel canale principale di scarico. La progettazione è legata alla quantità di portata a monte ed è indipendente dagli altri componenti dello stramazzo. Il flusso dal canale laterale viene deviato verso un corso d'acqua aperto di scarico, una condotta chiusa o un tunnel inclinato. In base alle caratteristiche del terreno, ci possono essere due o un solo canale laterale. La capacità di scarico è simile agli stramazzi e dipende dalla cresta dello sbarramento. In questo caso il flusso è controllato da un restringimento della parte a valle che potrebbe essere un punto delicato per il passaggio dell'acqua.



Figura 15. Schema di uno sfioratore con canale laterale (fonte: [www.attivitasolare.com](http://www.attivitasolare.com)).

3. Sfiatori a calice. È formato da un fusto verticale allargato in sommità ed è seguito da una condotta orizzontale passante attraverso il corpo della diga o la fondazione, per allontanare la portata in eccesso. Dal momento che l'acqua entrante è proporzionale alla circonferenza, lo sfioratore si allarga nella parte più superficiale. Lo sfioratore a calice viene utilizzato se non c'è abbastanza spazio per la costruzione di altre varietà di stramazzi. Il dimensionamento è molto complesso. Si differenziano due modalità di funzionamento, in base alla portata presente nella diga:

- i) a soglia sfiorante, per modeste portate e livelli di tirante ridotti, all'interno della sommità allargata è presente un cono d'aria;
- ii) sotto battente, quando la portata d'acqua e il tirante aumentano ed è tale per cui si ha la chiusura del cono d'aria, la condotta è in pressione e si ha il rischio di un moto turbolento.

È importante non sottodimensionare la portata massima, altrimenti lo sfioratore a calice si intasa e non è più in grado di svolgere la sua funzione in modo ottimale.

Inoltre è necessario ricavare l'altezza del tirante massimo consentito uguagliando la portata che defluisce nei casi i) e ii). Oltre questo livello si osserva che a un limitato aumento di portata corrisponde un elevato incremento di tirante, rendendo più difficile il corretto smaltimento dell'acqua.

Il coefficiente di efflusso vale circa  $C_q = 0,40$ . L'area è pari a quella del cilindro avente come raggio quello della condotta prima dell'allargamento superiore.

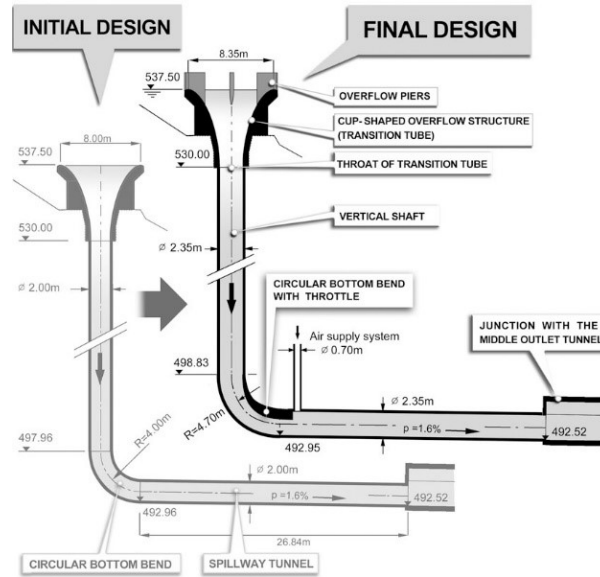


Figura 16. Schema di sfioratore a calice (fonte: [www.darioflaccovio.it](http://www.darioflaccovio.it)).



Figura 17. Esempio sfioratore a calice situato a Pontesei (Belluno) (fonte: [www.progettodighe.it](http://www.progettodighe.it)).





*Figura 19. Sfiatore a calice durante il funzionamento (fonte: [www.fratelligelmini.it](http://www.fratelligelmini.it)).*

4. Sfiatore a sifone. È formato da uno o da una serie di tubi a forma di U rovesciata. In condizioni di equilibrio, dentro la piega del tubo, il livello coincide con il livello esterno dell'acqua (figura 15). In seguito l'imbocco scende fino a sotto il livello massimo di monte e, con l'aumento del tirante, l'acqua inizia a entrare nella condotta (figura 16). Con l'aumento del il livello del tirante, l'aria viene eliminata poiché spinta dall'acqua verso valle (figura 17) e, quando tutta l'aria è uscita, si innesta il sifone e il funzionamento a regime (figura 18). Nel momento in cui il livello del serbatoio torna a scendere sotto il livello di ingresso dell'acqua, entra aria nella condotta e il sifone si disinnesca (figura 19). Il piede del sifone è sagomato in modo tale da impedire l'entrata di aria a valle. Bisogna prestare attenzione in corrispondenza della bocca del tubo poiché potrebbero fermarsi detriti e corpi galleggianti che causano ostruzione. Questa tipologia di sfiatore è utile poiché riesce a mantenere costante il livello a monte in modo automatico. Nel caso in cui ci sia la necessità si usano più sifoni, si pongono a quote leggermente diverse in modo da evitare l'entrata in funzione in contemporanea dato che questi elementi, vibrando molto, rischiano di crepare la struttura portante della diga. In passato è stato spesso utilizzato accoppiato a uno sfiatore rettilineo per diminuirne la lunghezza. Al giorno d'oggi, invece, di solito viene utilizzato nei canali per mantenere il livello costante.

- In questo caso il coefficiente di deflusso vale circa  $C_q = 0,50$ . L'area è relativa alla sezione di afflusso a valle e l'altezza è la differenza tra il livello d'acqua a monte e a valle del sifone.

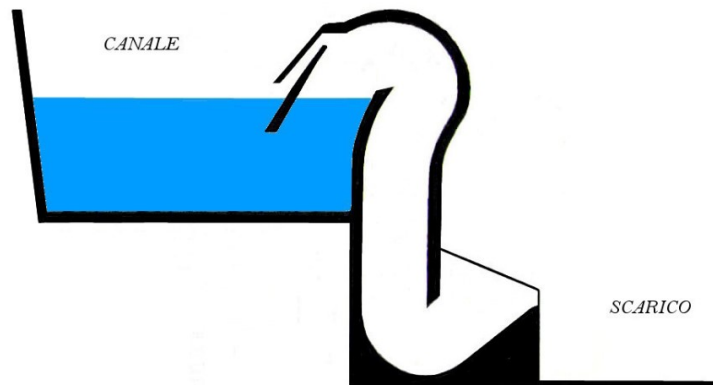


Figura 20. Sifone inattivo (fonte: [www.progettodighe.it](http://www.progettodighe.it)).

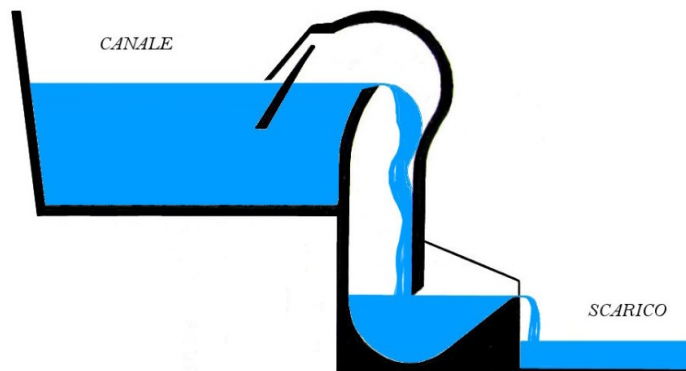


Figura 21. Livello dell'acqua nel serbatoio sale (fonte: [www.progettodighe.it](http://www.progettodighe.it)).

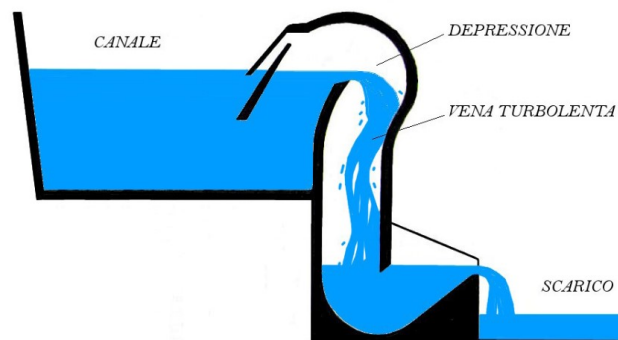


Figura 22. L'aria è spinta verso valle (fonte: [www.progettodighe.it](http://www.progettodighe.it)).

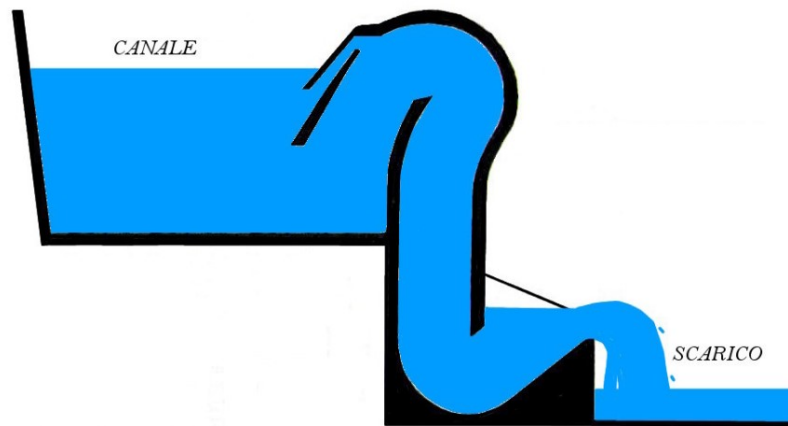


Figura 23. Sifone a regime (fonte: [www.progettodighe.it](http://www.progettodighe.it)).

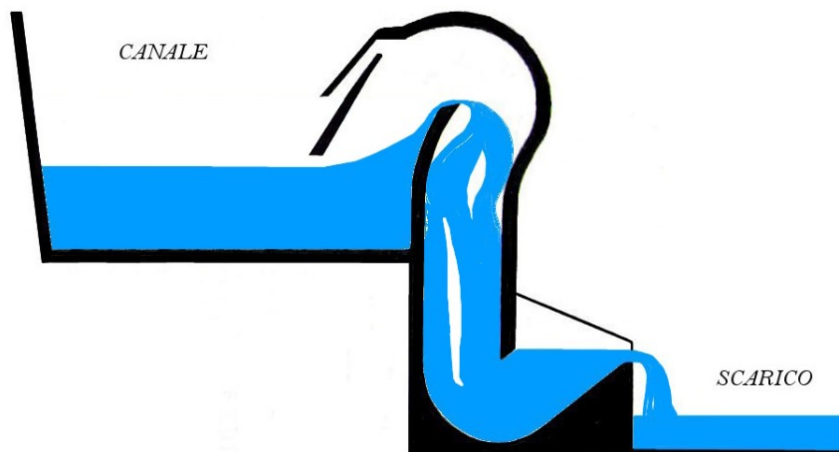


Figura 24. Disinnesco del sifone (fonte: [www.progettodighe.it](http://www.progettodighe.it)).



Figura 25. Sfiatore a sifone, schema ed esempio (fonte: [www.theconstructor.org](http://www.theconstructor.org)).

5. Sfioratori a labirinto. Questa tipologia viene utilizzata quando c'è poco spazio disponibile. Si costruisce una soglia formata da una sequenza di muri trapezoidali o triangolari per aumentare la superficie sfiorante in modo da allontanare una portata maggiore. I muri sono sottili e a sbalzo, verticali nella parte superiore e con pendenza ridotta nella parte inferiore, inoltre devono essere supportati da fondazioni robuste. Sono vantaggiosi dato che sono utilizzabili ovunque in base alle condizioni del sito. Vengono usati soprattutto quando la larghezza è fissata, il tirante a monte è ridotto e se serve una capacità di scarico elevata. Sono sfruttati anche come strutture di controllo o di deviazione per canali. I modelli di flusso sono molto complicati.



Figura 26. Esempio di sfioratore a labirinto (fonte: [www.theconstructor.org](http://www.theconstructor.org)).

È interessante portare un esempio di studio di sfioratori per mostrare l'evoluzione e la ricerca continua volta all'ottimizzazione dello spazio in funzione della portata sfiorata. L'esempio in questione è il *Piano Key Weirs*, studio sperimentale condotto dall'Università di Liegi, in Belgio al fine di migliorare le soglie sfioranti. Gli obiettivi sono incentrati sulla riduzione della larghezza di base degli sfioratori a labirinto in cui l'altezza è limitata, mantenendo una buona capacità di scarico e sulla formulazione di regole per prevedere la capacità di scarico.

Come prima cosa sono stati considerati i seguenti parametri:

- $W$ , larghezza trasversale;
- $P$ , altezza dello stramazzo;
- $n$ , numero degli elementi che formano lo stramazzo;
- $B$ , lunghezza della cresta laterale;
- $B_m$ , lunghezza di base;
- $a$  e  $b$ , larghezza in entrata e uscita;
- $e$ , spessore dei muri;
- $c$ , lunghezza delle sporgenze a valle;
- $d$ , lunghezza delle sporgenze a monte;
- $H$ , livello dell'acqua.

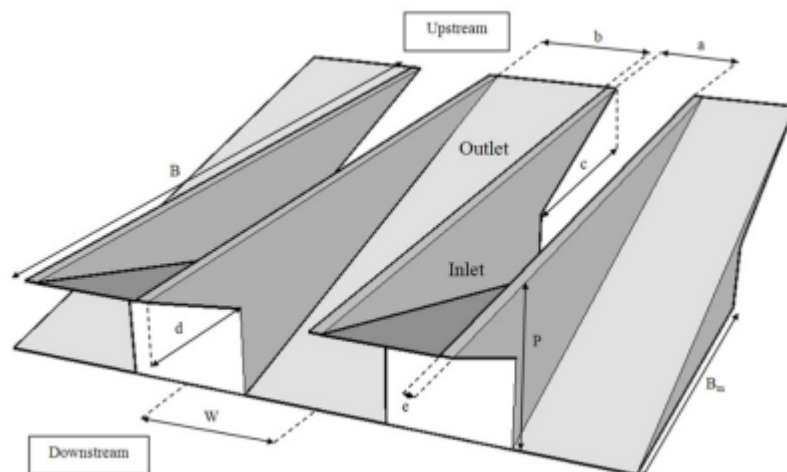


Figura 187. Schema piano key weir.

In seguito sono stati costruiti diversi modelli in scala con valori dei parametri diversi in base agli studi svolti dagli ingegneri per ottimizzare il flusso, capire l'influenza della geometria e trovare il corretto coefficiente di flusso da utilizzare.

Il primo esperimento è stato svolto su larga scala per definire la transizione tra i diversi modelli di deflusso per caratterizzare velocità, pressione e modello di flusso. Per la misura di velocità e pressione sono stati usati sei tubi di Pitot posti in sezioni diverse e ad altezze prestabilite. Per valutare il livello dell'acqua è stato usato un limnimetro associato a un nonio. I risultati ottenuti, anche se

non precisi come viene fatto notare dalle barre verticali di errore, evidenziano come la complessità della geometria dello stramazzo influenza in modo significativo il coefficiente di scarico  $C_w$ : per altezze ridotte dell'acqua rispetto allo stramazzo il coefficiente di scarico si riduce. Quest ultimo è strettamente legato allo spessore e alla forma della cresta. Si nota un picco per rapporti di  $H/P$  compresi tra 0,1 e 0,15 e in seguito il coefficiente di flusso diminuisce all'aumentare dell'altezza dell'acqua passante per lo sfioratore.

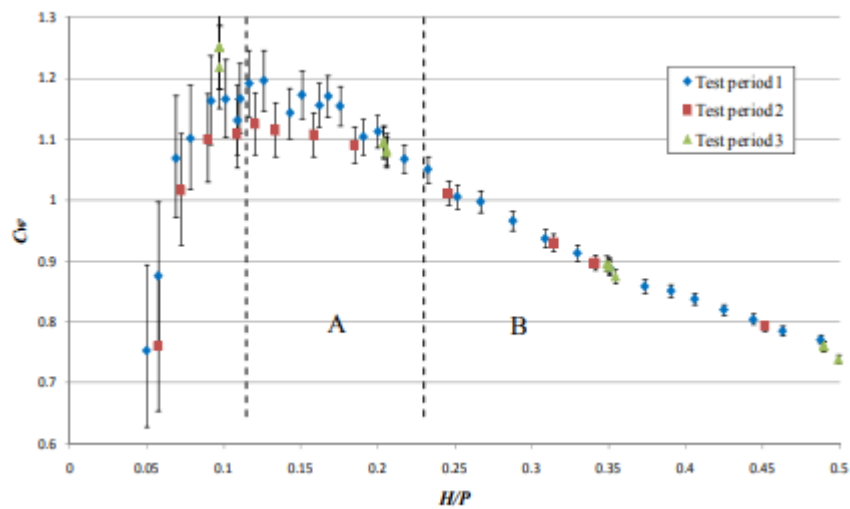


Figura 198. Risultati del primo test.

Il secondo esperimento si è concentrato sullo studio delle linee di flusso, dipendenti dal punto più alto a monte, ed evidenziate da coloranti. Si osserva che, per basse creste, la distribuzione della velocità lungo lo stramazzo è omogenea, al contrario per alte teste le linee di flusso sono meno omogenee. La transizione tra questi due profili di flussi è dipendente dalla transizione tra una superficie libera e piana e una ondulata.

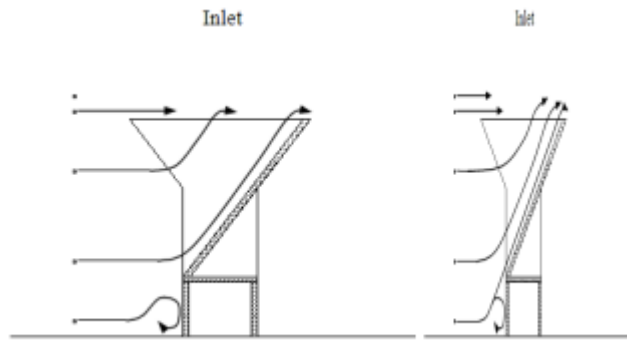


Figura 209. Linee di flusso per  $H/P < 0,2$  a sinistra e  $H/P < 0,2$  a destra.

Infine, durante il terzo ed ultimo studio, sono stati misurati i profili di pressione, velocità e superficie libera in condizione di basse creste ( $H/P=0,1$ ), alte creste ( $H/P$  tra 0,35 e 0,5) e per zone di transizione ( $H/P=0,2$ ). La superficie libera mostra la transizione tra andamento piano per basse teste e andamento ondulato per alte teste. Ai lati del muro e in mezzo all'entrata la pressione è approssimabile a quella idrostatica, ad eccezione delle zone davanti agli angoli e vicino all'ingresso in cui le linee di flusso sono vicine e quindi si generano sovrappressioni. Inoltre, la sovrappressione aumenta quando sale il livello dell'acqua a monte dello sfioro. Nel caso in cui lo sfioratore è alto, ai lati dei muri d'ingresso ci sono zone di ricircolo con velocità negative. La dimensione di tali zone aumenta in funzione dell'altezza di monte. Questa considerazione, unita alla variazione di pendenza nella parte inferiore, riduce la sezione di ingresso facendo aumentare la velocità (le linee di flusso si avvicinano).

Ecco spiegato l'esigenza di aumentare la larghezza a monte e la pendenza iniziale per poter aumentare la sezione trasversale. Lo strapiombo a monte riduce l'altezza iniziale e influenza le sezioni di controllo. Come ultima considerazione, si è osservato che l'uso di forme non rettangolari all'inizio degli strapiombi di monte diminuiscono la dimensione della zona di ricircolo e che comporta l'aumento della capacità di scarico.

6. Sfiatori mobili. Vengono utilizzati per aumentare il livello rispetto alla quota sfiorante nel caso di stramazzi a efflusso libero. Ci sono diverse tipologie e possono essere combinate tra loro. Gli organi mobili più usati sono:

- i) Paratoie a settore. Sono circolari e azionate quando viene rilevato un aumento del tirante fino a una quota prestabilita.

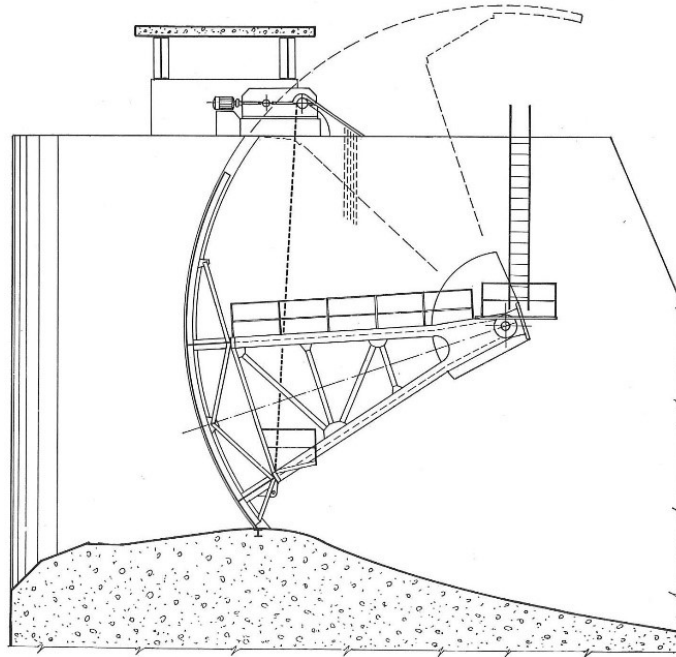


Figura 30. Schema paratoia a settore (fonte: [www.rivis.it](http://www.rivis.it)).

- ii) Paratoie a ventola. L'acqua spinge contro la paratoia ma per livelli contenuti un contrappeso è in grado di bilanciare la spinta dell'acqua mantenendo lo strumento in posizione verticale. Nel momento in cui l'acqua supera il livello stabilito, la paratoia si inclina abbassandosi e permettendo all'acqua di fluire.



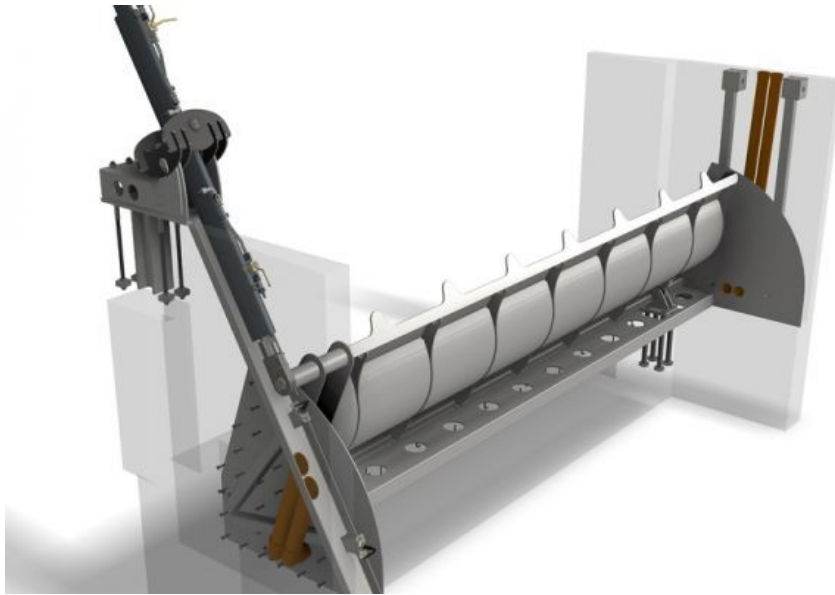


Figura 31. Schema paratoia a ventola (fonte: [www.wild-metal.com](http://www.wild-metal.com)).

## 2.5 Considerazioni sul coefficiente di deflusso per uno sfioratore sagomato

Il coefficiente di deflusso è influenzato da:

1. Altezza iniziale dello stramazzo. Se la curvatura dello stramazzo è ampia, la velocità di partenza del getto è limitata e l'acqua fluisce in modo minore, facendo diminuire il coefficiente di deflusso. In caso opposto, quando lo stramazzo ha una curvatura ridotta, la velocità di partenza dell'acqua è maggiore e la quantità di acqua che attraversa lo sfioratore è più grande e comporta un aumento del coefficiente di deflusso. Nel momento in cui la curvatura è nulla, non è più presente contrazione del getto;
2. Legame tra la forma effettiva dello stramazzo e la forma ideale (larga o stretta). Se la configurazione è larga, si ha una riduzione della capacità di scarico. Per profili più stretti, la capacità di scarico aumenta. Invece se la conformazione dello stramazzo è irregolare, è buona norma individuare il coefficiente di scarico considerando un profilo ideale che meglio approssima il caso reale;
3. Pendenza della superficie a monte dello sfioratore. Per pendenze limitate il coefficiente di deflusso aumenta, invece per pendenze della faccia a monte maggiori, il coefficiente di deflusso è minore;

4. Interferenza con la parte a monte dello stramazzo. Lo stramazzo è coperto d'acqua se a monte di esso il livello del bacino è abbastanza alto da provocare lo sversamento. La distanza verticale dal punto più alto dello stramazzo al canale di valle influenza il coefficiente di scarico. Si distinguono 5 tipologie di deflusso dell'acqua:
- i. Flusso continuo;
  - ii. Necessità di un parziale salto idraulico a valle dello stramazzo;
  - iii. Necessità di un salto idraulico;
  - iv. Il salto viene soffocato se l'elevata velocità del getto segue l'estensione dello stramazzo e continua in modo irregolare per una considerevole distanza al di sotto dello strato di acqua;
  - v. Non servono salti idraulici dal momento che il getto si rompe lontano dalla parete dello sfioratore per poi mescolarsi con l'acqua situata a valle.
- Il salto idraulico causa una diminuzione del coefficiente di deflusso e viene utilizzato per dissipare l'eccessiva energia dell'acqua in arrivo da monte, spesso dovuta alla sua velocità.



Figura 32. Schema altezza massima dello sfioratore.



## 3 DIGA DI RAVEDIS

### 3.1 Storia e caratteristiche generali

La diga di Ravedis è situata nel comune di Montereale Valcellina, in provincia di Pordenone ed è stata progettata principalmente per la laminazione delle onde di piena del torrente Cellina. Come scopi secondari, la struttura viene sfruttata anche per modulare le portate per l'irrigazione e l'uso potabile, infine per alimentare la centrale idroelettrica di Ponte Giulio anch'essa situata a Montereale Valcellina.

La diga è a gravità ordinaria e costituita con calcestruzzo. La valle in cui è posta la diga ha un profilo a V quasi simmetrico e con versanti caratterizzati da pendenze limitate. Poiché la roccia, formata in prevalenza da calcari, è soggetta a fratturazione, sono stati resi necessari degli accorgimenti in fase di costruzione tramite la realizzazione di berlinesi, cioè pali infissi nel terreno a distanza nota che aumentano la resistenza. È stato necessario anche impermeabilizzare la roccia con l'introduzione di due schermi, uno posto in corrispondenza del paramento di monte e l'altro in quello di valle. La procedura è stata svolta iniettando cemento in fori verticali e obliqui. Inoltre, una terza iniezione è stata realizzata ai lati del versante.

Per fini irrigui, già durante il secondo dopoguerra, gli enti gestori del territorio friulano avevano pensato di costruire un serbatoio in corrispondenza della stretta di Ravedis ma, per mancanza di fondi, il progetto è stato inizialmente accantonato. In seguito, alla fine degli anni '50, stavolta per scopi energetici, la società S.A.D.E. aveva ipotizzato la realizzazione di alcuni serbatoi ma il celebre disastro del Vajont avvenuto nel 1963 ha bloccato qualsiasi progetto di modifica del territorio montano. Solo con alcune disastrose alluvioni avvenute nel 1965 e nel 1966 in Friuli e nel Veneto orientale, è stata decisa la costruzione di alcuni serbatoi al fine di moderare le piene del torrente Cellina. La costruzione è stata lunga, il progetto è stato redatto nel 1974 e i lavori, svolti in 4 fasi, sono iniziati nel 1984 e si sono conclusi nel 2007.

L'altezza della diga è pari a 68m e il volume d'invaso è di 22,6Mm<sup>3</sup>. Il fiume che viene troncato è il Cellina e il bacino è quello del Livenza. Alla base lo spessore del muro è di 48m invece in cima si riduce fino a 3m. La quota di coronamento di trova a 343 m s.l.m.. Il corpo della diga ha una forma triangolare e quasi simmetrica, infatti i paramenti di monte e valle hanno inclinazione pari a 1:0,05 e 1:0,85. Come è evidenziato dalla figura 26, ai piedi della diga si trova un bacino di calma che permette di dissipare l'energia in eccesso con cui arriva l'acqua a seguito dello sfioro.

La diga è dotata dei seguenti scarichi:

1. Scarichi di superficie, distinti in:
  - a. soglia sfiorante nel corpo diga, formata da cinque soglie larghe ognuna 15m e poste a 338,50 m s.l.m., la massima portata sfiorante è pari a 550m<sup>3</sup>/s;
  - b. due scarichi laterali a becco d'anatra posti a quota 338,50m s.l.m. a monte del corpo diga e lunghi in totale 105m. In questo caso l'acqua sfiorata viene raccolta in un vasca, visibile nella figura 34, e poi ci sono tubazioni di diametro di 8m che la collega agli scarichi di fondo.



*Figura 33. Vista dall'alto della diga.*



*Figura 34. Vista dall'alto corpo diga e bacino di calma (fonte: [www.progettodighe.it](http://www.progettodighe.it)).*



*Figura 35. Soglia sfiorante del corpo della diga in funzione (fonte: [www.youreporter.it](http://www.youreporter.it)).*





Figura 36. Sfiatore a becco d'anatra (fonte: [www.progettodighe.it](http://www.progettodighe.it)).



Figura 37. Sfiatore a becco d'anatra in funzione (fonte: [www.fvg.tv](http://www.fvg.tv)).

2. scarichi di fondo, formati da gallerie con sezione circolare di 8m. Sono due e posizionati ai lati della diga, le gallerie immettono l'acqua nel torrente Cellina, poco prima del ponte di Ravedis.

La portata massima che può essere allontanata dall'uso congiunto degli scarichi di fondo e dagli sfioratori a becco d'anatra è pari a  $1400\text{m}^3/\text{s}$ ;

3. scarichi di mezzofondo ed esaurimento, sono formati da tubi di diametro di 2m e posti nella parte centrale della diga. Per lo scarico di mezzofondo l'imbocco si trova a 320m s.l.m. invece lo scarico di esaurimento è posto a 296m s.l.m.. La

portata massima che può essere evacuata dal funzionamento congiunto di questi organi di scarico è pari a 37 m<sup>3</sup>/s.

### 3.2 Considerazioni sugli idrogrammi di piena di progetto e reali

Eseguendo la somma algebrica di ogni elemento della diga capace di allontanare portata, si osserva che la quantità massima che la diga è in grado di trasferire al di fuori del serbatoio è pari circa a 1987m<sup>3</sup>/s. Di seguito si allega l'idrogramma di piena dell'evento eccezionale del 4 novembre del 1966 in base al quale è stato basato il dimensionamento della diga.

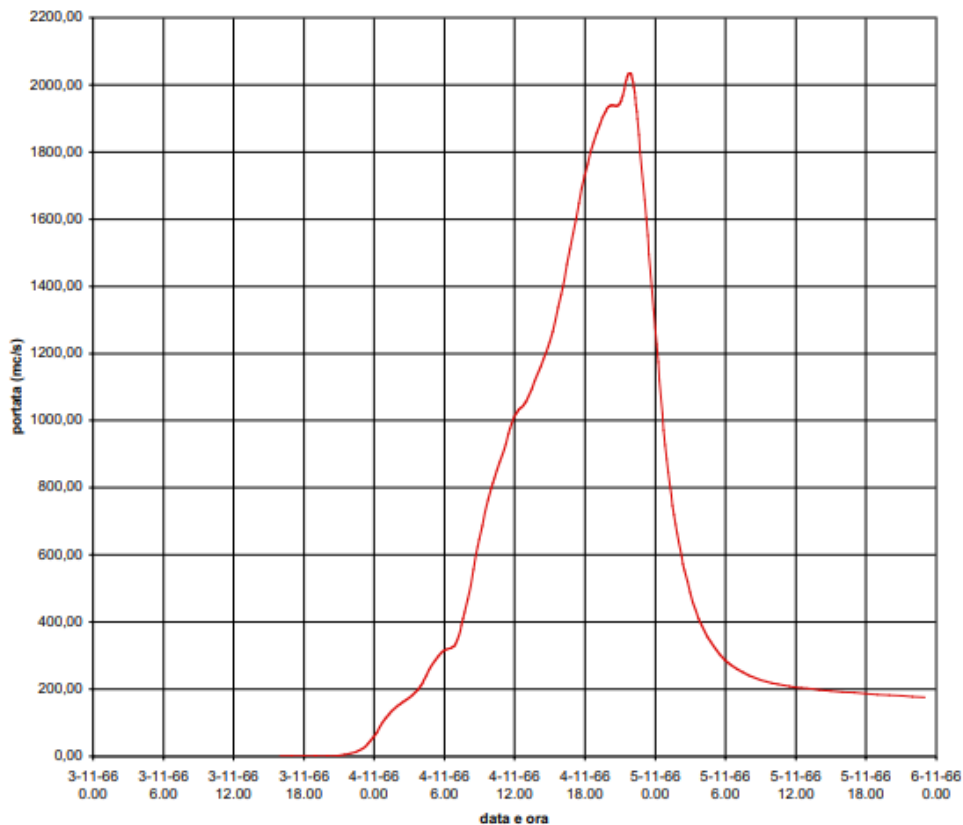


Figura 218. Idrogramma di progetto del torrente Cellina nella sezione di Ravedis.

La diga è stata dimensionata per essere in grado di allontanare una portata pari circa a 2000m<sup>3</sup>/s. Durante la perturbazione più violenta e recente registrata, denominato tempesta "Vaia" e sviluppata tra il 27 ottobre e il 30 ottobre 2018, la diga di Ravedis ha



avuto una importanza fondamentale. Dal grafico si osservano due picchi d'ingresso, il primo in cui la portata entrante è pari a circa  $620\text{m}^3/\text{s}$  e la seconda pari circa a  $1250\text{m}^3/\text{s}$ . L'onda in uscita è stata laminata, infatti nel primo caso la portata uscente si è ridotta fino a poco più di  $400\text{m}^3/\text{s}$  e nel secondo fino a poco più di  $800\text{m}^3/\text{s}$ . Inoltre, in entrambi i casi, i livelli erano inferiori ai valori di  $338,5\text{m}$  sl.lm. per cui entrano in azione gli scarichi di superficie.

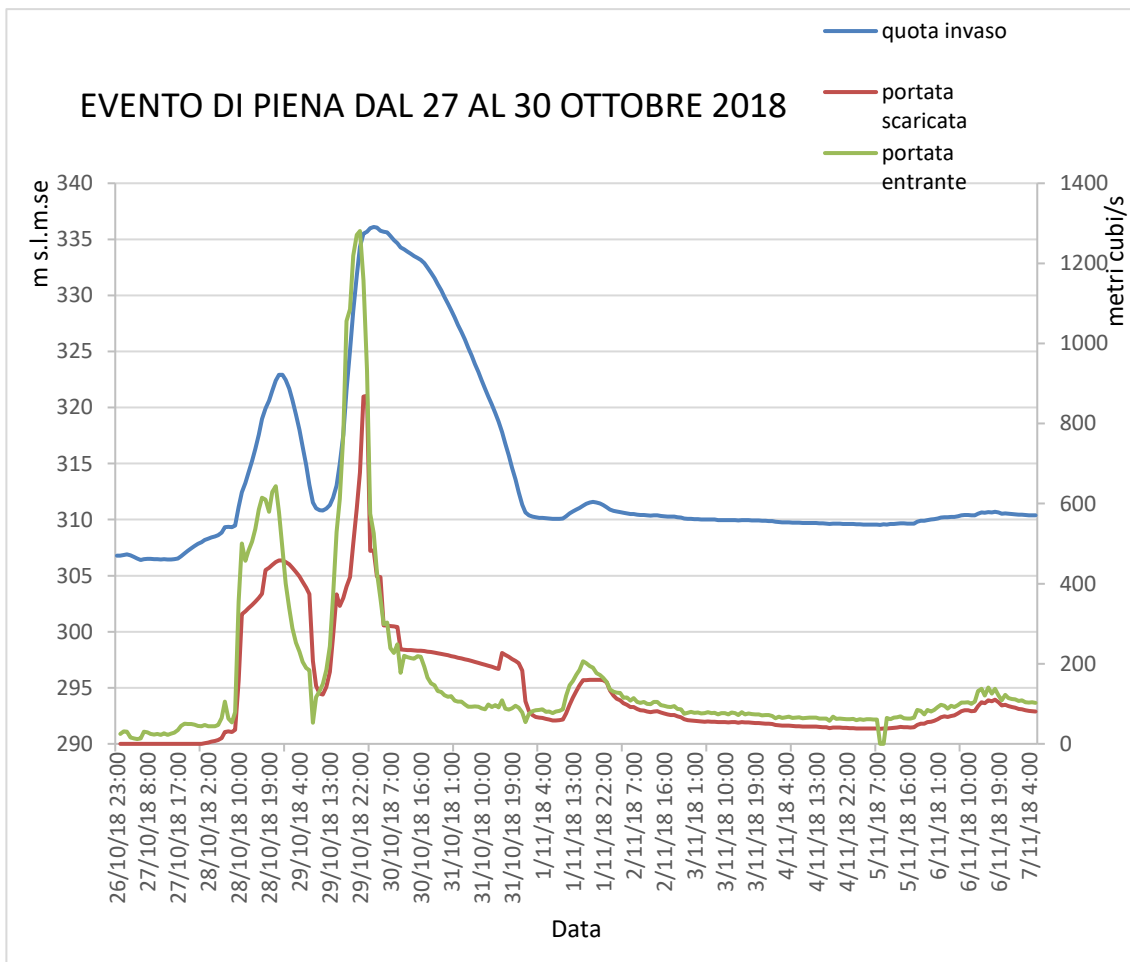


Figura 39. Idrogramma di piena.

## CONCLUSIONE

Gli errori commessi nel passato nella progettazione e realizzazione di grandi opere come le dighe sono stati acquisiti dagli ingegneri contemporanei che hanno teorizzato nuove soluzioni. In questa tesi sono state riportate solo alcune tipologie di sfioratori rispetto alle innumerevoli esistenti. Non ci sono soluzioni di sfioratori standard valide per tutti i casi, ma in ogni luogo devono essere dimensionati considerando tutte le variabili presenti.

Le dighe sono fondamentali per molti aspetti, dall'accumulo di acqua per scopi irrigui alla difesa idraulica mediante laminazione delle piene. Ad esempio, le alluvioni del 1965 e 1966 del Friuli e Veneto Orientale potevano essere scongiurate se la diga di Ravedis fosse stata costruita in precedenza.

Agli aspetti positivi legati alla costruzione delle dighe è innegabile che siano legate anche alcune criticità. Il clima del 2022 non ha le stesse caratteristiche del clima di inizio '900, motivo per cui le opere costruite 100 anni fa, attualmente non sono più in grado di adempiere alla funzione per cui sono state erette. In passato le piogge erano più frequenti ma i fenomeni estremi più rari, in particolare gli idrogrammi avevano colmi di intensità inferiore. Al contrario, oggi gli eventi di piena avvengono più di rado ma con un'intensità nettamente maggiore. Da qui nasce l'esigenza di riqualificare le opere idrauliche passate. Serve uno studio per il miglioramento e finanziamenti per svolgere i lavori che richiedono mesi se non anni per essere svolti. Subentra una seconda criticità: la burocrazia. Spesso le dighe vengono richieste da enti pubblici soggetti a regole precise e rigide.

La progettazione di una diga, come detto in precedenza, è uno studio complicato e richiede anni per poter risolvere ogni problema. Inoltre anche la durata dei lavori è una questione non di secondaria importanza. È strettamente legata all'aspetto economico, per questo la costruzione della diga di Ravedis si è protratta ben 23 anni.



## BIBLIOGRAFIA

- Da Deppo L., Salandin P, *Opere di scarico e presa per dighe, traverse e canali*, Padova, Libreria Progetto, 2012, 192pp
- UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, WATER RESOURCES TECHNICAL PUBLICATION, *Design of Small Dams*, 1987, 860pp
- Decreto Ministero dei Lavori Pubblici, 24/03/1982
- Norma Tecnica, 26/06/2014
- O. Machiels, S. Erpicum, B. J. Dewals, P. Archambeau, M. Piroton, *Piano Key Weirs: the experimental study of an efficient solution for rehabilitation*, 2010
- <https://theconstructor.org/water-resources/hydraulic-structures/different-types-spillways/32484/>
- <https://www.aboutcivil.org/spillway-definition-types-classification.html>
- <https://www.darioflaccovio.it/blog/informazione-tecnica/sfioratori-a-calice-nelle-dighe-cosa-sono-e-a-che-servono>
- <https://dgdighe.mit.gov.it/categoria/articolo/dighe-di-rilievo/diga-di-ravedis>
- <https://dgdighe.mit.gov.it/categoria/articolo/glossario/definizioni-elementi-diga>
- <https://www.progettodighe.it/tecnica/dove-costruire-una-diga/#mainanchor>
- <https://www.progettodighe.it/tecnica/il-corpo-della-diga/#mainanchor>