

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

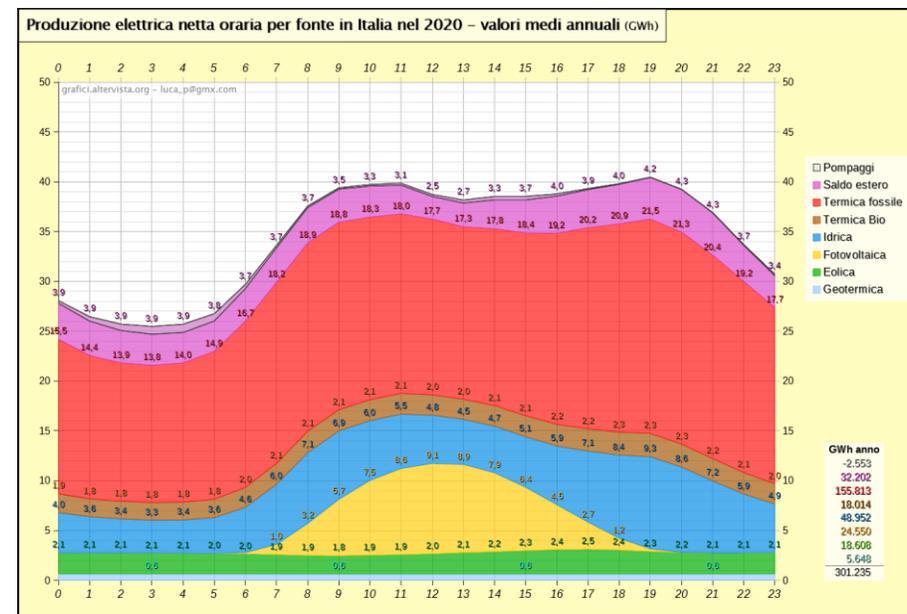
***Relazione per la prova finale
«Analisi delle condotte forzate negli
impianti idroelettrici»***

Tutor universitario: Prof. Anna Stoppato

Laureando: *Kevin Aurilio*

Padova, 17/11/2023

Essendo l'energia elettrica costantemente richiesta, seppur con intensità variabile, quella delle centrali idroelettriche è oggi una fonte indispensabile, sia per il carico di base nelle centrali ad acqua fluente, sia per il carico di punta con i serbatoi (ed il pompaggio), senza emissioni di CO₂.



La necessità di variare la produzione di energia elettrica comporta una continua modifica a monte della portata d'acqua, che passando attraverso le condotte forzate, va a sollecitare quest'ultime, senza dimenticare le componenti in gioco durante il normale funzionamento a regime stazionario.

CLASSIFICAZIONE

Salto idraulico

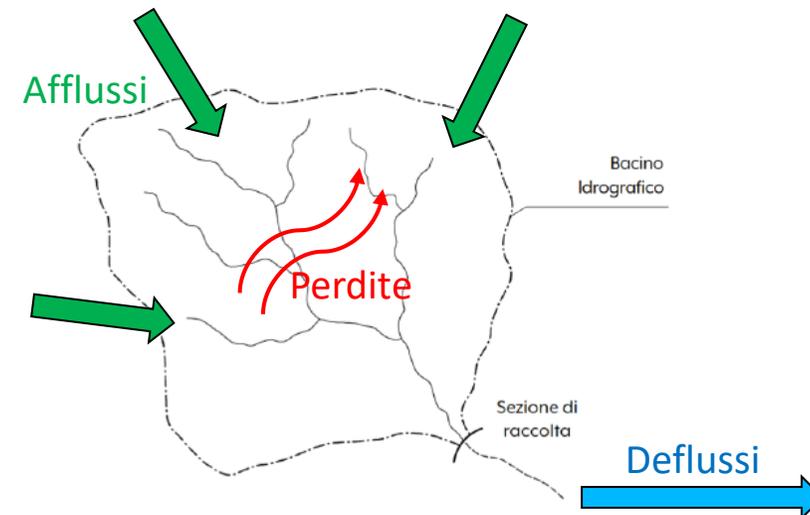
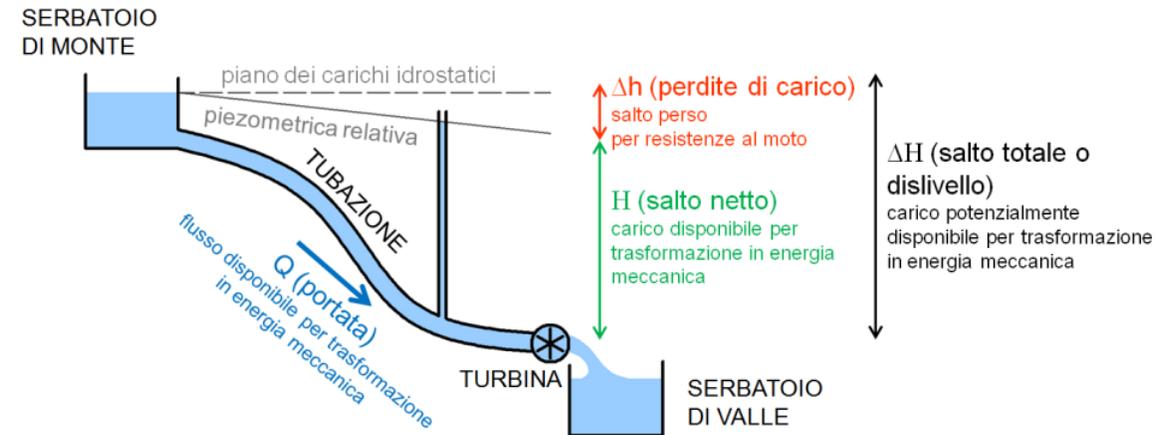
Dislivello esistente fra la quota del bacino di raccolta e quello di restituzione (al netto delle perdite)

- Altissimo salto: $H > 1000 \text{ m}$
- Alto salto: $1000 > H > 250 \text{ m}$
- Medio salto: $250 > H > 50 \text{ m}$
- Basso salto: $H < 50 \text{ m}$

Portata idrica derivata

Quantità d'acqua che si potrebbe idealmente utilizzare costantemente una volta rilevati gli afflussi, i deflussi e le perdite

- Grandissima portata: $Q > 1000 \text{ mc/s}$
- Grande portata: $1000 > Q > 100 \text{ mc/s}$
- Media portata: $100 > Q > 10 \text{ mc/s}$
- Piccola portata: $Q < 10 \text{ mc/s}$



CLASSIFICAZIONE

Tipologia funzionale

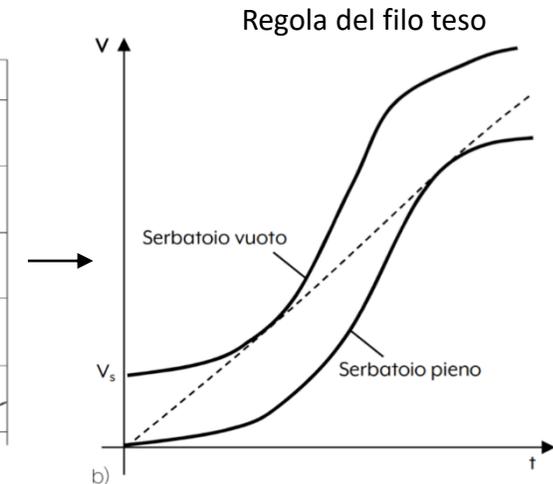
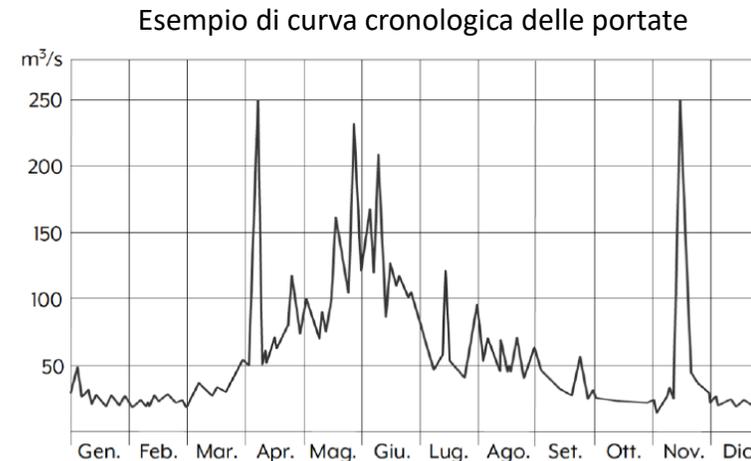
Parametro che è funzione del tempo necessario per riempire il serbatoio a monte con la portata media annua

- Ad accumulo tramite pompaggio: $T > 400$ h
- A serbatoio : $400 > T > 2$ h
- Ad acqua fluente: $T < 2$ h

Potenza idroelettrica

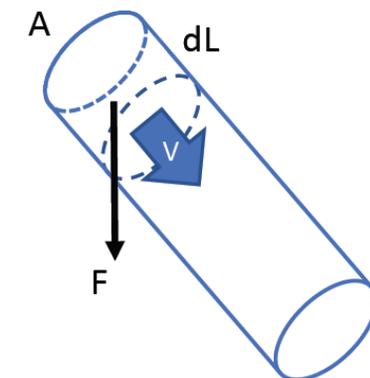
E' la potenza nominale idraulica dell'acqua in caduta da una tubazione

- Grandi impianti: $P_{ni} > 10$ MW
- Piccoli impianti: $10 > P_{ni} > 1$ MW
- Mini impianti: $1 > P_{ni} > 0,1$ MW
- Micro impianti: $P_{ni} < 0,1$ MW



$$P_{ni} = \gamma \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \text{ [kW]}$$

Peso specifico



ELEMENTI COSTITUTIVI

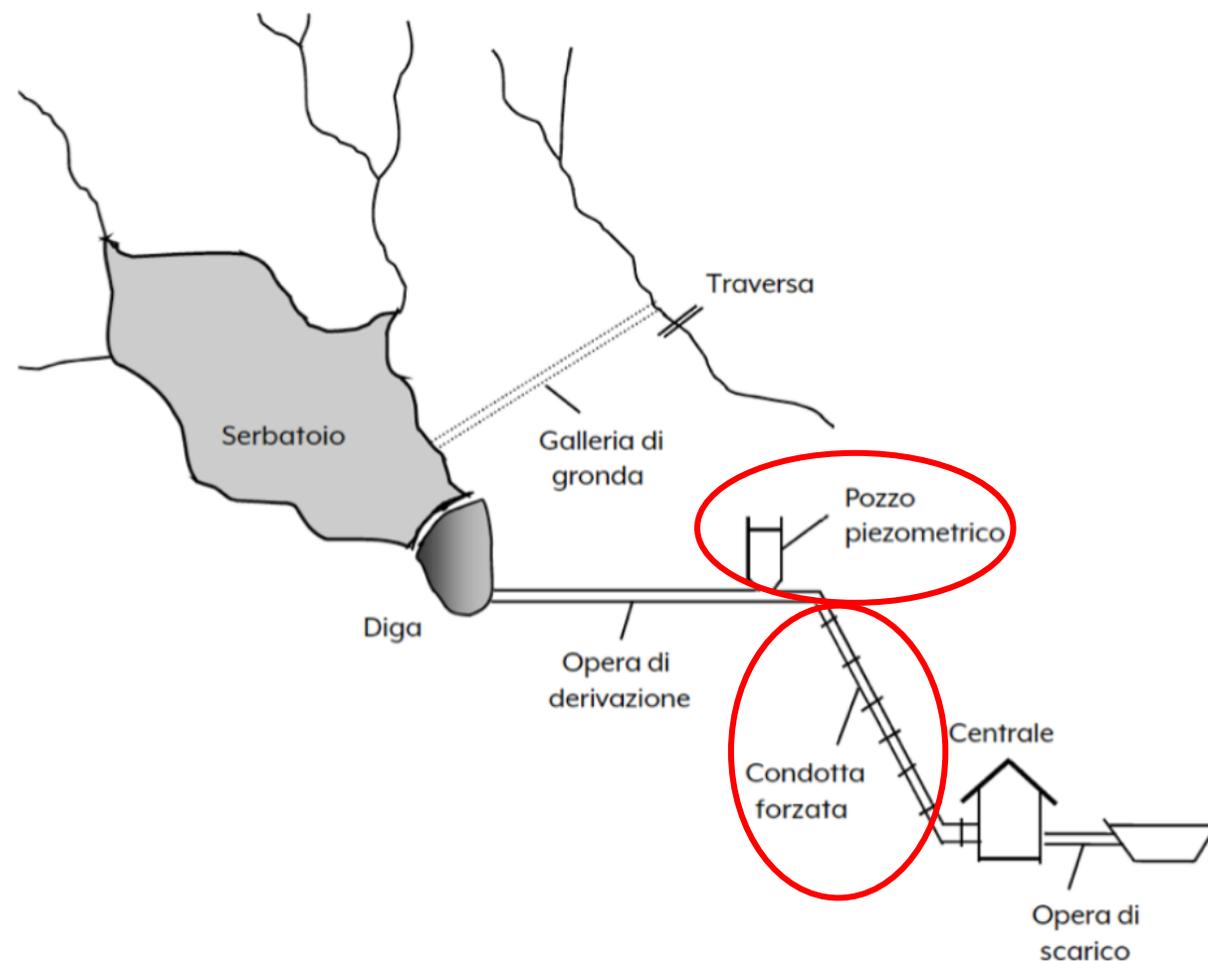
Pozzo piezometrico

Serbatoio artificiale d'acqua in collegamento con la condotta forzata, che riduce la sovrappressione di colpo d'ariete ed evita che si propaghi in galleria.

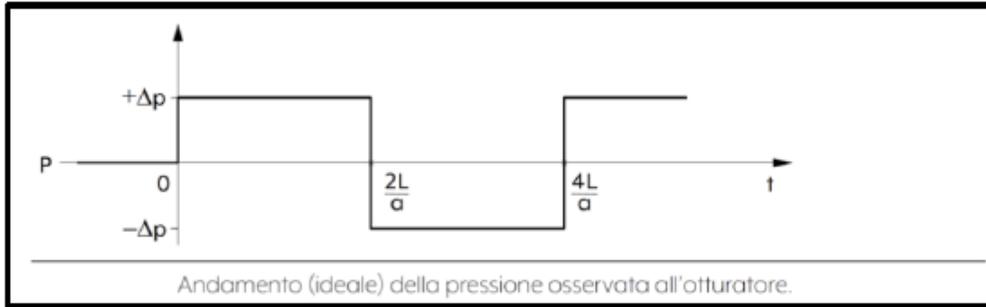


Condotta forzata

Realizza il raccordo idraulico tra la vasca di monte ed il macchinario idraulico della centrale. Sono tubazioni circolari in pressione in cui viene convogliata la portata Q .

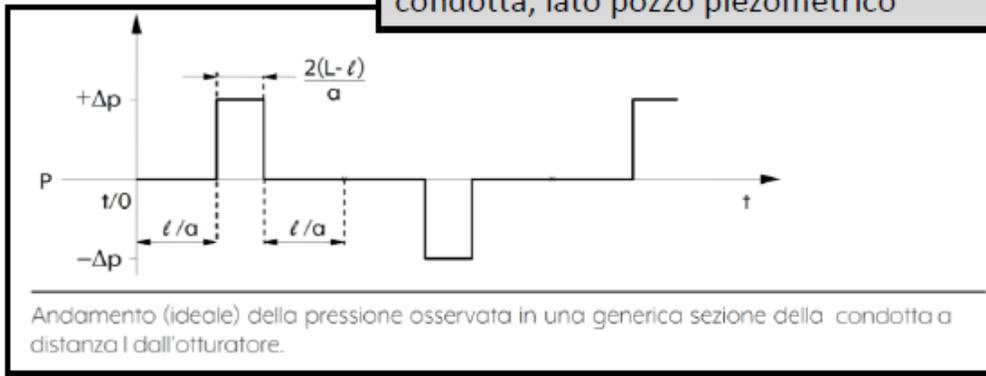


TRANSITORIO IDRAULICO E COLPO D'ARIETE

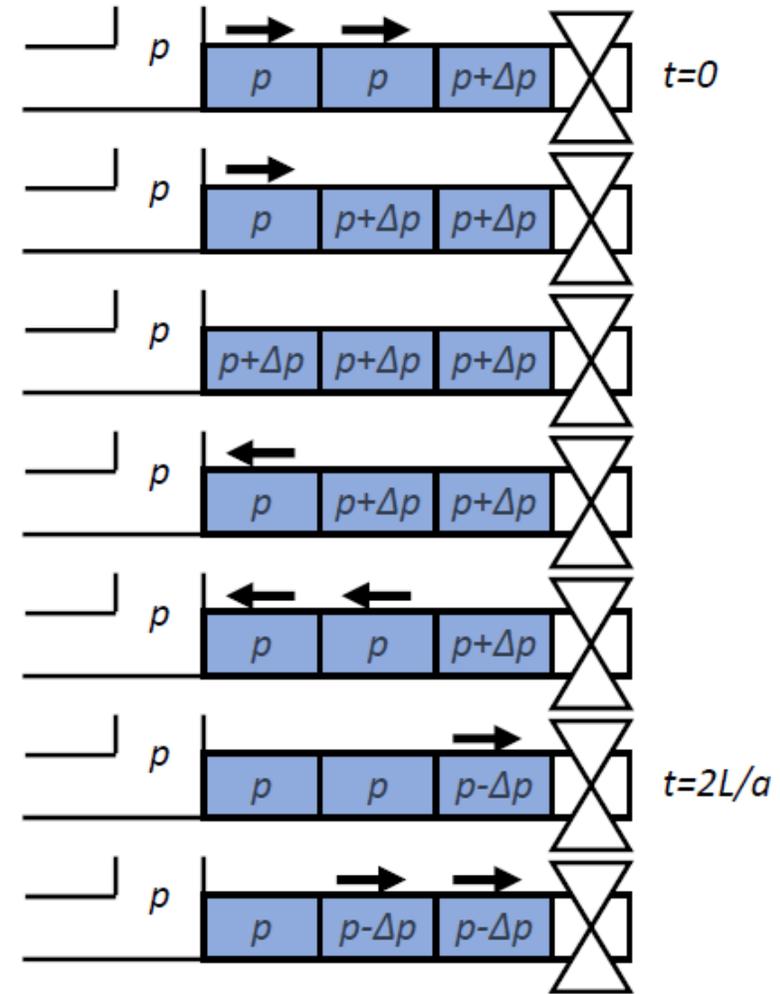


Otturatore (in
centrale)

La durata della perturbazione della pressione è tanto più breve quanto più ci avviciniamo all'imbocco della condotta, lato pozzo piezometrico



Punto della
condotta distante
l dall'otturatore



TIPOLOGIE COSTRUTTIVE: MATERIALI

Acciaio

Si uniscono i tubi realizzati a partire da lamiere calandrate o spiralmate.

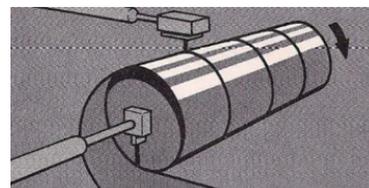
- Tubi chiodati

Utilizzo di rivetti
(non più in uso
causa corrosione)



- Tubi saldati

- Per bollitura (fino anni '40)
- Ad arco elettrico (obsoleto)
- Ad arco sommerso (SAW)
- Ad arco con gas (MIG, MAG)
- Con elettrodo in tungsteno (TIG)



- Tubi blindati

Anima + anelli laminati

- Blindatura a caldo o a freddo
- Alte cadute e grande diametro

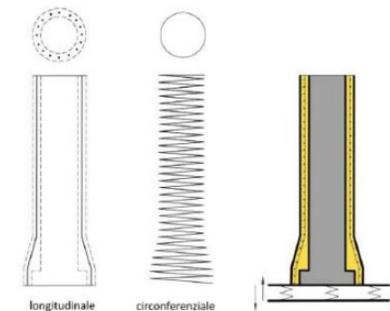


Calcestruzzo (cls) armato

Sono realizzati in stampi in cui viene inserita l'armatura interna ed aggiunta quella esterna in alcune applicazioni.

- Tubi in cls armato ordinario

Esternamente il tubo è armato con barre longitudinali e trasversalmente con armatura a elica e rivestito con calcestruzzo



- Tubi in cls armato precompresso

- Gabbia interna precompressa nello stampo
- Diametri 1.900 - 2.100 mm; Pressioni 6 - 28 atm

- Tubi ad armatura diffusa (TAD)

- Armatura in migliaia di fili in acciaio ad alta resistenza uniformemente distribuiti
- resistente ad alta trazione → pressioni > 25 atm



- Tubi in cls precompresso con cilindro d'acciaio inglobato

- Diametri fino a 6.400 mm; Pressioni > 30 atm

TIPOLOGIE COSTRUTTIVE: MATERIALI

Ghisa

Utilizzate dal 1800, le condotte erano in ghisa grigia colata in sabbia, sostituite nel secondo dopoguerra con quelle in ghisa grigia sferoidale. Garantiscono un'ottima tenuta idraulica sotto pressioni elevate con costi ridotti.

Schema tipico di stratificazione:

- Rivestimento esterno in poliuretano
- Zincatura a caldo
- Ghisa duttile
- Rivestimento interno in malta di cemento per trasporto di acqua potabile

Processo produttivo:



Colatura



Raffreddamento



Ricottura

Materiale plastico

- Condotte in PEAD (Polietilene ad alta densità)

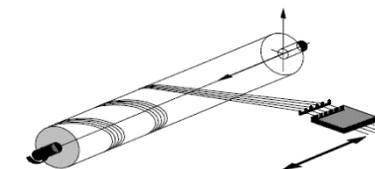
Prodotte dalla polimerizzazione dell'etilene a bassa pressione e successiva estrusione a caldo.

- possibile elevata dilatazione termica dei tubi
- buona resistenza meccanica e chimica
- ridotta scabrezza per il passaggio del fluido

- Condotte in PRFV (Poliestere rinforzato con fibre di vetro)

Matrice di resine termoindurenti di poliestere con inglobate fibre di vetro, polimerizzata a temperatura ambiente.

- resine non tossiche
- buona tenuta a pressioni medio-alte (10-25 atm)
- buona resistenza meccanica e chimica



Legno

Le più antiche (oggi obsolete), costituite da un tronco forato o da doghe affiancate, fasciate con bandelle metalliche.

TIPOLOGIE COSTRUTTIVE: POSA IN OPERA

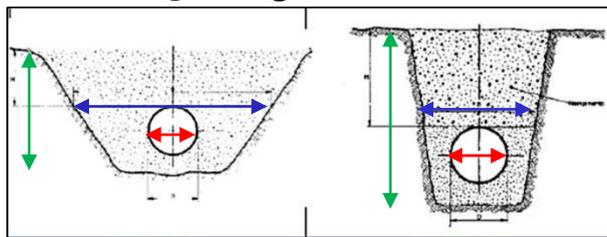
Condotte interrate

Invisibili → ridotto impatto ambientale, ma difficoltoso il controllo.

Tipologie:

- Trincea stretta: $B \leq 2D$ con $H \geq 1,5B$
oppure $2D \leq B \leq 3D$ con $H \geq 3,5D$

- Trincea larga: negli altri casi



Inoltre bisogna distinguere:

- tubazioni rigide: resistenza flessionale, limitate deformazioni
- tubazioni flessibili: ovalizzazione, deformazione calcolabile

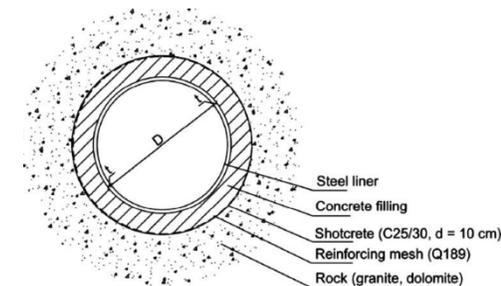
$$\left(\Delta d = \frac{C \cdot K \cdot F}{8 \cdot SN + 0,061 \cdot E_t} \quad [mm] \right)$$

Condotte aeree

- Libere all'aperto: seguono il profilo del terreno → maggiori vertici, cambi di direzione e angoli più pronunciati, soggette agli agenti atmosferici, costi di realizzazione bassi.
- Libere in galleria: minori problematiche ambientali, variazioni di temperatura più contenute, pressoché rettilinee, cambi di pendenza minimi, costi di realizzazione molto più alti.
- Condotte a vertici liberi: prive di giunti di dilatazione, esse si dilatano verso l'alto o verso il basso a seconda che i vertici siano concavi o convessi.
- Condotte a vertici bloccati: con giunti di dilatazione tra due blocchi di ancoraggio, nelle deviazioni angolari della condotta.

Condotte inghisate in roccia

La roccia circostante il tubo collabora a sostenere la pressione interna, ripartendo lo sforzo tra i diversi elementi → buona tenuta idraulica e risparmio di materiale.



Il processo di costruzione prevede: scavo della galleria, inserimento del tubo d'acciaio, riempimento dello spazio vuoto circostante con cls, vibrazione. Quando il cls solidifica fa freddare il tubo, che può staccarsi e formare un'intercapedine. Vengono quindi pompate miscele cementizie per tappare i vuoti.

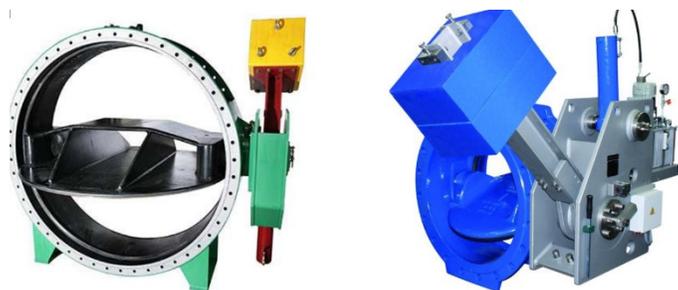
ELEMENTI COSTITUTIVI

Organi di intercettazione

Principalmente due tipi di valvole:

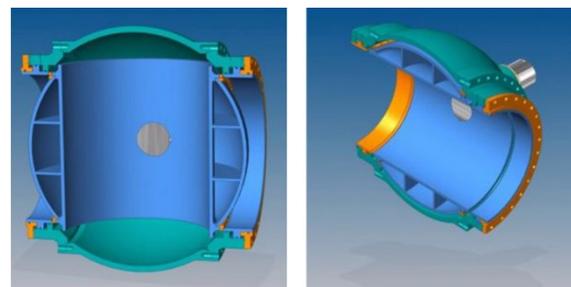
- Valvole di **macchina (M)**: intercettano il flusso d'acqua prima dell'ingresso in turbina
- Valvole di **testa condotta (TC)**: interrompono il flusso in caso di guasto

Valvole a farfalla



- Valvole sia di tipo **M** che **TC**
- Alto e altissimo salto
- Perdite di carico >

Valvole rotative



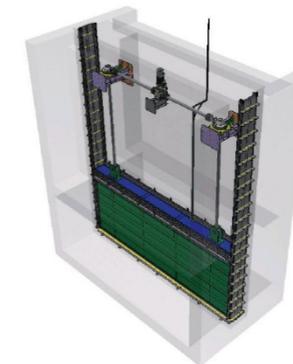
- Valvole di tipo **M**
- Salto utile > 100 m
- Perdite di carico <

Valvole a fuso



- Valvole di tipo **TC**
- Medio salto
- Perdite di carico <<
- Cavitazione quasi nulla

Valvole piane



- Valvole di tipo **TC**
- Medio salto
- Perdite di carico <

ELEMENTI COSTITUTIVI

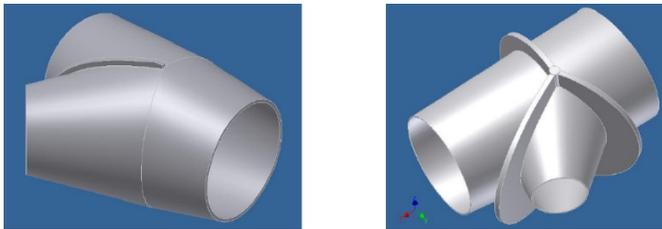
Tubo aeroforo

Sfiato di tipo **TC** che permette l'espulsione dell'aria o il suo rientro nelle fasi di riempimento o vuotamento della condotta, evitando così il formarsi di pressioni anomale all'interno della stessa.



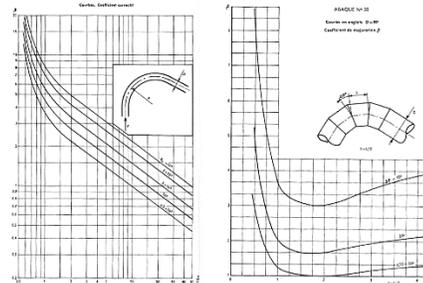
Pezzi speciali

Biforcazioni, triforcazioni



- A setto interno rinforzata con anima interna
- A setto esterno rinforzata con nervature esterne
- Valutazione di perdite di carico

Curve



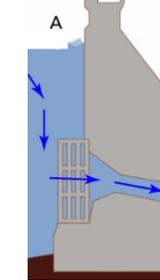
- Planimetriche
- Altimetriche
- Plano-altimetriche
- Valutazione di perdite di carico e spinta idraulica

Coni



- Convergenti
- Divergenti
- Valutazione di perdite di carico e spinta idraulica

Imbocchi



- Di varia natura in funzione del collegamento bacino-condotta
- Valutazione di perdite di carico

Giunti di dilatazione



- Sistema «a cannocchiale»
- Dilatazioni delle condotte per variazione di temperatura

ELEMENTI COSTITUTIVI

Opere civili

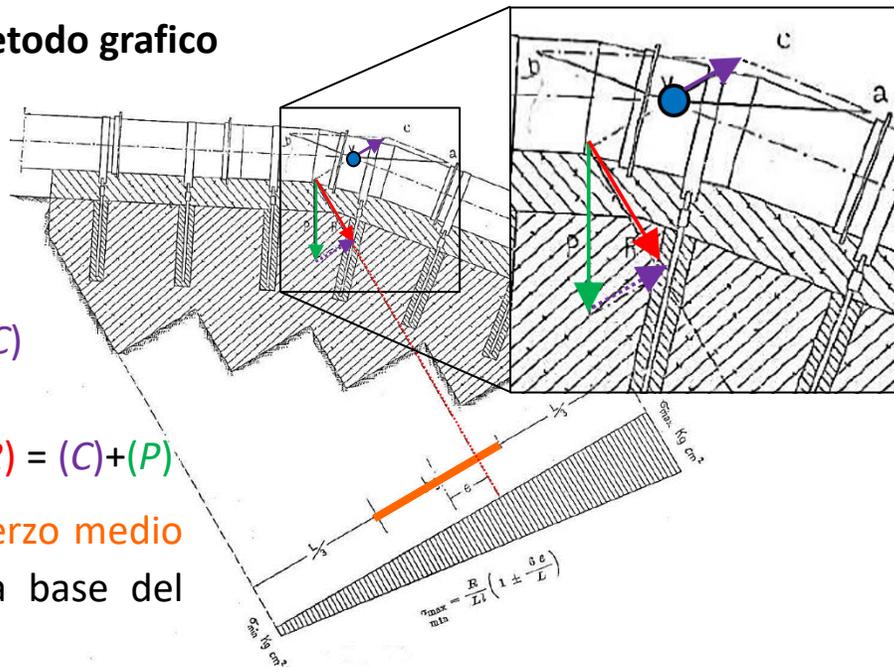
Blocchi

Abitualmente realizzati in calcestruzzo, trasmettono il peso delle condotte nel terreno, accuratamente compattato per evitare che possa cedere sotto gli sforzi. Si deve anche verificare l'impossibilità della formazione di flussi d'acqua tra il blocco ed il terreno.

Dimensionamento: metodo grafico

- Applicazione forze agenti in condotta (V)
- Risultante delle forze in condotta (C)
- Peso del blocco (P)
- Risultante totale (R) = (C)+(P)

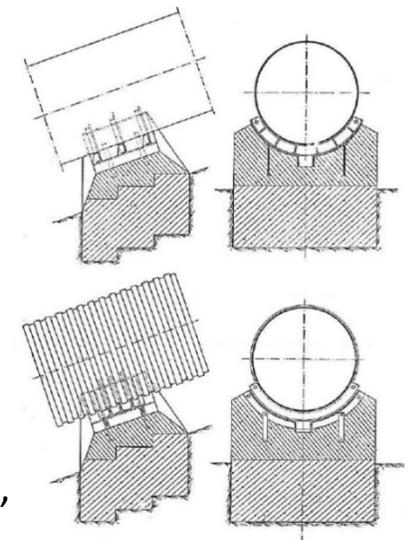
(R) deve cadere nel terzo medio della proiezione della base del blocco



Selle

Per facilitare i movimenti della tubazione si interpongono tra gli appoggi e la tubazione delle selle metalliche:

- *selle in lamiera metallica curvata* (obsolete)
- *selle piane*, per condotte di piccolo diametro e spostamenti nel senso trasversale
- *selle circolari*, eliminano tutti gli inconvenienti lamentati precedentemente
- *selle a rulli o a pieducci*, quando occorre ridurre al minimo la spinta orizzontale sugli appoggi
- *selle regolabili nelle tre direzioni*, in presenza di movimenti di grande entità



DIMENSIONAMENTO DELLE CONDOTTE FORZATE

Numero delle condotte

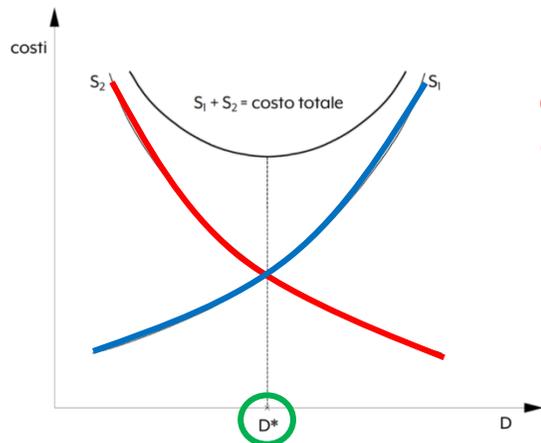
Grandi portate → diametri e spessori elevati
→ necessità di più condotte in parallelo.

A parità di perdite, il peso G per la realizzazione di n condotte in parallelo, anziché una sola, dipende dalla relazione:

$$G_n = G_1 \cdot \sqrt[3]{n} \quad (+15\% \text{ accessori}) \quad [kN]$$

Diametro delle condotte

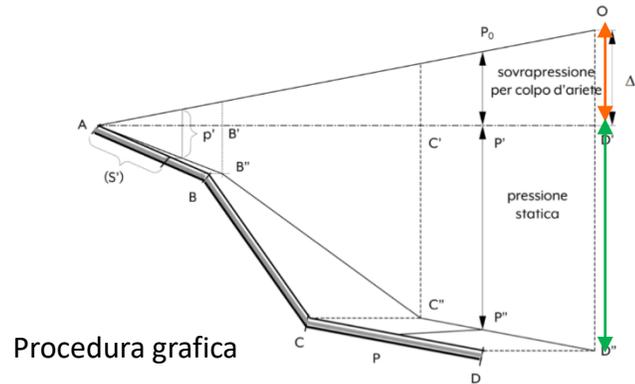
Criterio di maggior convenienza economica



Costi di gestione
(perdite in condotta)

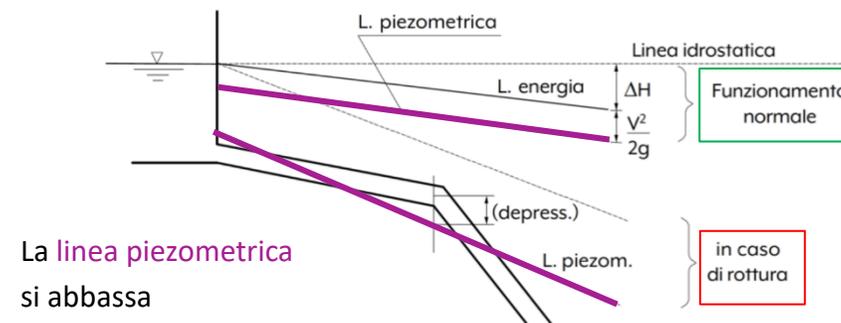
Costi di
realizzazione

Pressione di dimensionamento

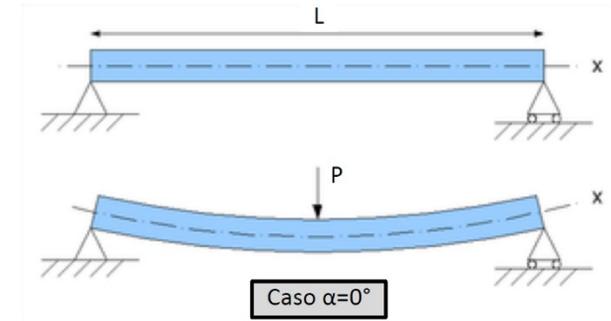


Verifica a schiacciamento

In caso di rottura della condotta la velocità dell'acqua aumenta notevolmente → aumento portata e perdite di carico.



Flessione



Sollecitazione « σ » a flessione semplice, carico uniformemente distribuito P :

$$\sigma = 8 \cdot \frac{P \cdot L^2 \cdot \cos(\alpha)}{W} \quad [N/mm^2]$$

Modulo di resistenza flessionale del materiale

PRINCIPALI PROBLEMATICHE A CUI SONO SOGGETTE LE CONDOTTE FORZATE

Corrosione (ad umido)

Generalizzata

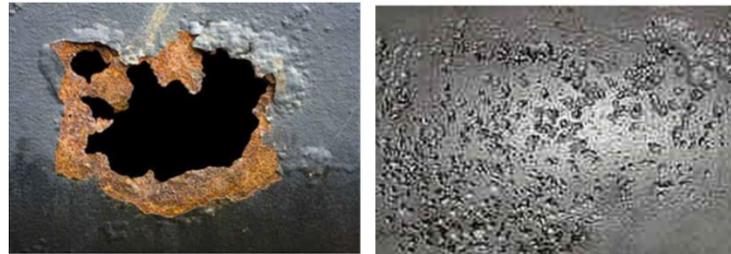
Interessa tutte le superfici, esprimibile come perdita di peso o spessore del tubo per unità di tempo.

→ Penetrazione uniforme

- Trascurabile <math>< 50 \mu\text{m}/\text{anno}</math>
- Bassa <math>< 50/100 \mu\text{m}/\text{anno}</math>
- Modesta <math>< 100/500 \mu\text{m}/\text{anno}</math>
- Severa <math>< 500/1000 \mu\text{m}/\text{anno}</math>
- Molto severa $> 1000 \mu\text{m}/\text{anno}$

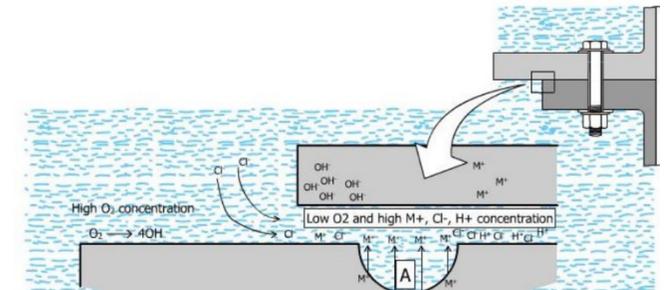
Per pitting

Attacchi localizzati con penetrazione molto severa in corrispondenza dei punti in cui il film passivo è più debole, per inclusioni superficiali, difetti del materiale o vernice.



Interstiziale

Ristagno di acqua, fattori microbiologici, difficoltà di espletare la prevenzione negli interstizi porta alla loro corrosione.



Rottura per pressione interna dovuta al colpo d'ariete

I danni per **pressione elevata** possono essere:

- Rottura della condotta
- Danni alle apparecchiature
- Danni alle pompe, alle strutture di appoggio e alle valvole

I danni da **depressione** invece sono:

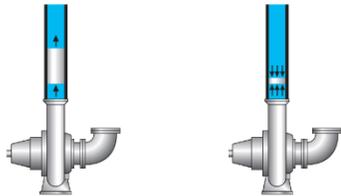
- Imbozzamento della condotta
- Rottura del rivestimento in calcestruzzo
- Separazione della colonna d'acqua

PRINCIPALI PROBLEMATICHE A CUI SONO SOGGETTE LE CONDOTTE FORZATE

Rottura per variazione repentina della pressione interna

Separazione della colonna d'acqua

Durante un colpo d'ariete importante o uno svuotamento rapido, si crea una bolla di vapore e comincia a crescere, formando un'area di bassa pressione, che diminuisce in dimensione e aumenta in pressione all'avvicinarsi delle due colonne di liquido.



Vibrazioni in condotta

La rotazione delle macchine provocano costantemente vibrazioni. Oscillazioni con frequenze dell'impianto simili a quelle della condotta possono dare origine a onde di pressione (le più pericolose), cavitazione, formazione di vortici e fenomeni di risonanza nelle turbine.

Aria in condotta

Durante uno svuotamento rapido delle condotte si può creare una depressione all'interno della stessa che può innescare un fenomeno di instabilità e il conseguente accartocciamento del tubo.



Effetti generati dal sisma sulle condotte

Nelle condotte in pressione le sollecitazioni di sovra-pressione sono decisamente inferiori rispetto a quelli del colpo d'ariete, in particolare per le condotte lunghe, che hanno un periodo naturale di vibrazione dell'ordine di secondi. Naturalmente nelle condotte corte la frequenza propria di vibrazione delle onde di pressione è più breve e quindi più vicina alle frequenze tipiche del sisma.

→ Problemi contrastati già nella progettazione

GRAZIE