



Committente

tecnici

ORDINE DEGLI INGEGNERI  
DELLA PROV. DI BOLZANO  
**Dr. Ing. WALTER GOSTNER**  
Nr. 1191  
INGENIEURKAMMER  
DER PROVINZ BOZEN

## Progetto definitivo

RUOTI ENERGIA S.r.l.  
Piazza del Grano 3  
39100 Bolzano (BZ)

committente

Impianto di accumulo idroelettrico mediante pompaggio denominato "Mandra Moretta" e relative opere connesse ed infrastrutture indispensabili nei Comuni di Ruoti, Avigliano, Potenza, Pietragalla, Cancellara e Vaglio Basilicata (PZ)

progetto

Relazione idraulica – Misure di attenuazione dei fenomeni di moto vario

| redatto        | modificato         | scala  | elaborato n. |
|----------------|--------------------|--|--------------|
| AB 22.09.2023  | a                  |  | PD-R.4.2     |
| controllato    | b                  |  |              |
| WaG 28.09.2023 | c                  |  |              |
| pagine 32      | n. progetto 11-213 | 11_213_PSKW_Ruoti\inr1\inr\text\Integrazioni_2023\PD-R.4.2_rel_motovario_02.docx |              |



Studio di Geologia e Geolngegneria  
Dott. Geol. Antonio De Carlo

Dott. Geol. Antonio De Carlo  
Via del Seminario 35 – 85100 Potenza (PZ)  
tel. +39 0971 180 0373  
[studiogeopotenza@libero.it](mailto:studiogeopotenza@libero.it)



**BETTIOL ING. LINO SRL**  
Società di Ingegneria

S.L.: Via G. Marconi 7 - 31027 Spresiano (TV)  
S.O.: Via Panà 56ter - 35027 Noventa Padovana (PD)  
Tel. 049 7332277 - Fax. 049 7332273  
E-mail: [bettiolinglinosrl@legalmail.it](mailto:bettiolinglinosrl@legalmail.it)

## patscheiderpartner

ENGINEERS

Ingegneri Patscheider & Partner S.r.l.  
i-39024 mals/malles (bz) - glurnserstraße 5/k via glorenza  
i-39100 bozen/bolzano - negrellistraße 13/c via negrelli  
a-6130 schwaz - mindelheimerstraße 6  
tel. +39 0473 83 05 05 – fax +39 0473 83 53 01  
[info@ipp.bz.it](mailto:info@ipp.bz.it) – [www.patscheiderpartner.it](http://www.patscheiderpartner.it)

## Indice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introduzione</b> .....   | <b>3</b>  |
| 1.1 Committente .....  | 3         |
| 1.2 Progettisti incaricati .....   | 3         |
| 1.3 Oggetto del documento .....  | 4         |
| <b>2. Generalità</b> .....   | <b>5</b>  |
| 2.1 Fenomeni di moto vario.....  | 5         |
| 2.2 Colpo d'Ariete .....   | 6         |
| <b>3. Valutazione delle alternative tecniche</b> .....                                   | <b>7</b>  |
| 3.1 Premessa .....   | 7         |
| 3.2 Pozzo piezometrico .....   | 8         |
| 3.2.1 Definizione e funzionamento.....   | 8         |
| 3.2.2 Schema e posizionamento.....   | 8         |
| 3.2.3 Limitazioni e Considerazioni per l'Applicazione.....                               | 9         |
| 3.3 Pozzo piezometrico ad aria compressa .....   | 9         |
| 3.3.1 Definizione e Funzionamento.....   | 9         |
| 3.3.2 Schema e Posizionamento .....  | 10        |
| 3.3.3 Svantaggi e limitazioni .....  | 10        |
| 3.3.4 Esempi di impianti simili già realizzati .....                                     | 11        |
| 3.4 Bypass con valvola di sicurezza .....  | 12        |
| 3.4.1 Definizione e Funzionamento.....   | 12        |
| 3.4.2 Schema e Posizionamento .....  | 12        |
| 3.4.3 Esempi di impianti simili già realizzati .....                                     | 13        |
| 3.4.3.1 Hoover Dam (Stati Uniti).....  | 13        |
| 3.4.3.2 Zlatoličje HPP (Slovenia).....   | 14        |
| 3.4.3.3 Yesilvadi HPP (Turchia) .....  | 16        |
| 3.4.3.4 Altri esempi.....  | 17        |
| 3.5 Scelta della variante progettuale.....   | 17        |
| <b>4. Valutazioni idrauliche</b> .....   | <b>18</b> |
| 4.1 Calcoli idraulici e dimensionamento condotte senza mitigazioni per il Colpo d'Ariete | 18        |
| 4.1.1 Calcolo delle sovrappressioni dinamiche .....                                      | 18        |
| 4.1.2 Calcolo delle pressioni per il dimensionamento della condotta .....                | 18        |
| 4.1.3 Dimensionamento degli spessori della condotta forzata .....                        | 19        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.2       | Opera di attenuazione di fenomeni di moto vario .....   | 20        |
| 4.3       | Calcoli idraulici e dimensionamento della condotta considerando l'opera di attenuazione di fenomeni di moto vario ..... | 22        |
| 4.3.1     | Calcolo delle sovrappressioni dinamiche .....   | 22        |
| 4.3.2     | Calcolo delle pressioni per il dimensionamento della condotta .....   | 22        |
| 4.3.3     | Dimensionamento degli spessori della condotta .....   | 23        |
| 4.3.4     | Vantaggi.....   | 23        |
| 4.3.5     | Ulteriori approfondimenti in fase di progettazione esecutiva .....  | 24        |
| <b>5.</b> | <b>Conclusioni.....</b>   | <b>26</b> |
|           | <b>Appendice 1 .....</b>  | <b>27</b> |
|           | <b>Appendice 2 .....</b>  | <b>30</b> |

## 1. Introduzione

### 1.1 Committente

**RUOTI ENERGIA S.r.l.**

Piazza del Grano 3

39100 Bolzano (BZ)

### 1.2 Progettisti incaricati

Coordinatore di progetto:

**Dott. Ing. Walter Gostner**

Ingegneri Patscheider & Partner S.r.l.

Opere civili ed idrauliche

**Ingegneri Patscheider & Partner Srl**

Via Glorencia 5/K

39024 Malles (BZ)

Responsabile opere idrauliche:

Responsabile opere civili:

Coordinamento interno:

Progettisti:

Via Negrelli 13/C

39100 Bolzano (BZ)

Dott. Ing. Walter Gostner

Dott. Ing. Ronald Patscheider

Dott. Ing. Corrado Lucarelli

Dott. Ing. Marco Demattè

MSc ETH Alex Balzarini

Dott.ssa For. Giulia Bisoffi

Tecn. Alexander Gambetta

Geom. Marion Stecher

Geom. Stefania Fontanella

Per. Agr. Luciano Fiozzi

Geologia e geotecnica

Consulenti specialistici:

**Dott. Geol. Antonio De Carlo**

Studio di Geologia e Geingegneria

Via del Seminario 35

85100 Potenza (PZ)

Archeologia

Consulenti specialistici:

**Dott.ssa Miriam Susini**

Via San Luca 5

85100 Potenza (PZ)

Acustica

Consulenti specialistici:

**Dott. Ing. Filippo Continisio**

Acusticambiente

Via Marecchia 40

70022 Altamura (BA)

Biologia, botanica, pedo-agronomia

Consulenti specialistici:

**Dott.ssa Antonella Pellegrino**

PhD Applied Biology, Environmental Advisor

Via Gran Bretagna 37

81055 S. Maria C. V. (CE)

<https://www.ingesp.it>

Opere elettriche – Impianto Utenza per la Connessione

Progettista e consulente specialista:

**Bettiol Ing. Lino S.r.l.**

Dott.ssa Ing. Giulia Bettiol

Società di Ingegneria

Via G. Marconi 7

I-31027 Spresiano (TV)

Inserimento paesaggistico delle opere di impianto e di utenza

Consulenti:

**Architettura Energia Paesaggio**

Dott.ssa Arch. Daniela Moderini

Dott. Arch. Giovanni Selano

Santa Croce 1387

I-30135 Venezia (VE)

### 1.3 Oggetto del documento

Come richiesto dalla Commissione Tecnica PNRR – PNIEC del Ministero della Transizione Ecologia nella comunicazione inoltrata al Proponente nel marzo 2023 (CTVA. REGISTRO UFFICIALE U. 0031062.03-03-2023) in merito alle integrazioni alla documentazione presentata per l'istanza di avvio del procedimento di Valutazione di Impatto Ambientale relativa all'*Impianto di accumulo idroelettrico mediante pompaggio denominato "Mandra Moretta" e relative*

*opere connesse ed infrastrutture indispensabili nei Comuni di Ruoti, Avigliano, Potenza, Pietragalla, Cancellara e Vaglio Basilicata (PZ)”, si redige il presente documento con l’obiettivo di indagare e approfondire le soluzioni tecniche proposte per la gestione e l’attenuazione dei fenomeni di moto vario associati all’esercizio dell’impianto di accumulo idroelettrico "Mandra Morretta". In particolare, questo documento intende:*

- Fornire una descrizione dettagliata dei meccanismi e delle cause alla base dei fenomeni di moto vario nell’ambito delle operazioni di pompaggio e produzione energetica, mettendo in luce le sfide e i rischi idraulici associati.
- Illustrare i criteri e le metodologie adottate per la selezione e la progettazione delle misure di attenuazione, inclusi i dettagli costruttivi, le valvole e le eventuali modifiche infrastrutturali.
- Presentare le soluzioni tecniche e le misure di attenuazione progettate per garantire il corretto funzionamento dell’impianto in tutte le sue fasi operative, limitando gli impatti sul sistema idrico circostante e assicurando la protezione delle infrastrutture.
- Analizzare, attraverso studi di caso e calcoli idraulici, l’efficacia delle soluzioni proposte, valutando il loro comportamento in vari scenari operativi e le possibili interazioni con le componenti esistenti dell’impianto.
- Fornire raccomandazioni e linee guida per la gestione operativa dell’impianto.

Concludendo, questo documento risponde alle richieste avanzate dalla Commissione Tecnica PNRR – PNIEC, fornendo un quadro completo e dettagliato delle misure di attenuazione dei fenomeni di moto vario previste l’impianto a pompaggio in progetto. L’obiettivo finale è garantire un funzionamento sicuro ed efficiente dell’impianto, tutelando allo stesso tempo l’ambiente e le risorse idriche delle aree di intervento.

## **2. Generalità**

### **2.1 Fenomeni di moto vario**

Il moto vario in idraulica si riferisce a qualunque cambiamento di velocità o direzione del flusso d’acqua in una condotta. Questi cambiamenti possono verificarsi per varie ragioni, tra cui variazioni nella domanda d’acqua, l’apertura o la chiusura di valvole, avviamento o arresto di pompe, e così via. Questi fenomeni sono di particolare rilevanza nelle condotte ad alta pressione, come quelle presenti negli impianti di accumulo idroelettrico mediante pompaggio, poiché possono causare variazioni significative nella pressione all’interno delle condotte stesse.

Gli effetti dei fenomeni di moto vario possono essere analizzati attraverso le equazioni di Saint-Venant, che descrivono l'evoluzione nel tempo delle variabili idrodinamiche, ovvero altezza e velocità del flusso d'acqua, in un canale o in una condotta.

## 2.2 Colpo d'Ariete

Il Colpo d'Ariete è forse il fenomeno di moto vario più noto e potenzialmente pericoloso. Si tratta di un fenomeno transitorio che si verifica a seguito di variazioni improvvise delle condizioni operative all'interno di una condotta. L'acqua è praticamente incomprimibile a basse velocità, ma quando si verifica un cambiamento rapido nella sua velocità o direzione di flusso, come una chiusura repentina di una valvola o l'arresto improvviso di una pompa, l'energia cinetica dell'acqua deve essere dissipata. L'acqua, tuttavia, non può fermarsi immediatamente a causa della sua inerzia. Questa energia cinetica viene quindi convertita in energia potenziale, causando una rapida elevazione della pressione. L'incremento di pressione si propaga all'indietro come un'onda lungo la tubazione fino a quando non trova un punto dove può essere riflessa, come un serbatoio o un cambiamento nella sezione della tubazione. Man mano che l'onda di pressione si riflette e si propaga avanti e indietro lungo la condotta, può causare variazioni di pressione significative. Se non gestite adeguatamente, queste fluttuazioni di pressione possono danneggiare o rompere le tubazioni, gli accessori e le valvole, o causare altri problemi operativi. La comprensione e la gestione di questo fenomeno sono essenziali per prevenire potenziali danni strutturali alle condotte e per garantire la sicurezza dell'impianto.

Esistono diversi metodi matematici e modelli che sono stati sviluppati per studiare e caratterizzare il Colpo d'Ariete:

- **Metodo di Joukowski:** Questo è uno degli approcci più semplici ed è spesso la prima analisi utilizzata. Si basa su un'analisi semplificata del fenomeno considerando le variazioni di momentum e conservazione dell'energia. Sebbene non fornisca una descrizione completa del fenomeno, offre una stima rapida delle pressioni massime che possono svilupparsi.
- **Metodo di Michaud/Allievi:** Questo metodo utilizza un'analisi più dettagliata rispetto a Joukowski. Si basa sulla soluzione delle equazioni differenziali che descrivono il movimento dell'acqua nelle condotte. Michaud e Allievi hanno introdotto diverse correzioni e miglioramenti per tener conto delle resistenze viscosa e delle condizioni reali delle pareti delle condotte.
- **Metodo di Budau:** Fornisce una stima del colpo d'ariete in funzione del tempo, concentrandosi sulle fasi iniziali del fenomeno. Questo metodo è particolarmente utile per analizzare

le rapide variazioni di pressione che possono verificarsi immediatamente dopo un evento scatenante.

- **Colonna d'acqua rigida:** Questo metodo considera l'acqua all'interno della condotta come una colonna rigida. È una semplificazione del fenomeno, ma può fornire una buona approssimazione in specifiche condizioni, come quando la velocità dell'onda di pressione è molto più alta rispetto alle velocità del flusso.

Tuttavia, la scelta del metodo appropriato dipende dalla specifica applicazione e dalla precisione richiesta nell'analisi.

### 3. Valutazione delle alternative tecniche

#### 3.1 Premessa

La gestione del moto vario negli impianti idroelettrici rappresenta una sfida fondamentale, essenziale sia per garantire l'efficienza operativa che la sicurezza strutturale dell'infrastruttura. Tali fenomeni transitori possono generare rapidi cambiamenti di pressione che, se non opportunamente gestiti, potrebbero causare danni alle strutture o compromettere l'intera operatività dell'impianto. Con l'intento di controllare e attenuare le sovrappressioni e i fenomeni transitori, sono state introdotte diverse misure tecnologiche:

- **Aumento dell'inerzia della turbina:** aggiunta di volani alle piccole unità o incremento dell'inerzia del generatore.
- **Resistori:** utilizzati per assorbire potenza eccessiva.
- **Pozzo piezometrico:** inserito per ridurre la lunghezza attiva delle condotte riducendo il tempo di riflessione.
- **Pozzo piezometrico ad aria compressa:** necessita di una fonte di aria compressa.
- **Bypass con valvola di sicurezza:** la valvola si apre a una pressione impostata limitando l'aumento di pressione.

Ciascuna di queste misure ha le proprie specificità, vantaggi e limitazioni. Tuttavia, è da notare che, la soluzione ottimale per un determinato impianto potrebbe anche derivare dalla combinazione di più di queste misure, se possibile. Nel contesto specifico del nostro impianto, l'aumento dell'inerzia della turbina o del generatore e l'inserimento di resistori non sono possibili a causa di questioni tecniche e strutturali.

Nei seguenti capitoli, verranno approfonditi il sistema classico e più comune di gestione del moto vario, ovvero il pozzo piezometrico, e le alternative tecnologiche fattibili per l'impianto in progetto.



## 3.2 Pozzo piezometrico

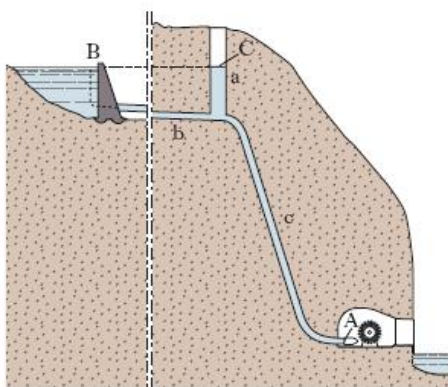
### 3.2.1 Definizione e funzionamento

Il pozzo piezometrico, anche noto come torrino piezometrico, serbatoio piezometrico o vasca di oscillazione, rappresenta una soluzione idraulica pensata per contrastare gli effetti deleteri del colpo d'ariete in impianti idroelettrici o in altri sistemi di tubazioni. Si tratta essenzialmente di una colonna verticale d'acqua, direttamente collegata alla condotta principale, concepita per assorbire con prontezza le fluttuazioni di pressione.

Durante un colpo d'ariete, la pressione all'interno della condotta principale cresce rapidamente. Il pozzo piezometrico, offrendo un percorso di minore resistenza, consente all'acqua di risalire verticalmente all'interno della colonna. Questa migrazione dell'acqua nella colonna verticale contribuisce a smorzare l'energia cinetica correlata all'onda di pressione, evitando così variazioni eccessive di pressione nel sistema.

### 3.2.2 Schema e posizionamento

Il design tradizionale di molti impianti idroelettrici vede un invaso di monte dal quale origina una galleria di derivazione con pendenza molto contenuta, che prosegue fino alle vicinanze della centrale. Qui, si verifica un cambio di pendenza marcato, trasformando la galleria in una condotta forzata molto più ripida. Esattamente in questo punto di transizione, viene inserita una condotta verticale con sbocco all'aria libera, denominata pozzo piezometrico (Figura 1).



**Figura 1. Profilo longitudinale schematico di una centrale idroelettrica ad alta caduta con pozzo piezometrico: a pozzo piezometrico, b galleria di derivazione, c condotta forzata.**

Il suo scopo è quello di diminuire le sovrappressioni dovute ai colpi d'ariete nella condotta forzata e pressoché di annullarle nella galleria di derivazione. Infatti, siccome la sovrappressione massima (in fondo alla condotta forzata) è proporzionale alla distanza dal pelo libero, l'impiego di

un pozzo p. riduce la distanza AB misurata lungo la condotta fino alla superficie del serbatoio, alla distanza AC, misurata lungo la condotta fino alla superficie libera del pozzo piezometrico. Più il pozzo piezometrico è prossimo alla centrale, maggiore sarà la sua efficacia nell'attenuare le fluttuazioni di pressione.

### 3.2.3 Limitazioni e Considerazioni per l'Applicazione

Nell'analisi della fattibilità dell'applicazione del pozzo piezometrico all'impianto in questione, sono emerse alcune limitazioni peculiari al contesto geografico e strutturale di Ruoti:

- Topografia e pendenza della Condotta: Diversamente da quanto si verifica in molti impianti idroelettrici, dove esiste un tratto iniziale con minima pendenza prima di entrare in una condotta forzata ripida, la situazione topografica di Ruoti non permette tale configurazione. Infatti, la condotta forzata inizia direttamente dall'invaso e si sviluppa verso la centrale con una pendenza elevata, senza tratti preliminari di minore inclinazione.
- Impossibilità di inserire un pozzo piezometrico: Una delle soluzioni classiche per attenuare il colpo d'ariete consiste nell'inserire un pozzo piezometrico che riduca il tratto AC (come mostrato in Figura 1), accorciando così il tempo di riflessione e conseguentemente attenuando l'effetto del colpo d'ariete. Tuttavia, nel contesto dell'impianto di Ruoti, ci si trova di fronte a una sfida strutturale: in nessun punto della condotta forzata è possibile posizionare un pozzo che possa raggiungere un livello d'acqua adeguato (corrispondente al livello massimo dell'invaso più l'alzamento massimo durante un evento) senza dover ricorrere a opere superficiali. Queste ultime, oltre a presentare un impatto paesaggistico significativo, in certi casi potrebbero risultare non fattibili a causa delle complessità costruttive e le dimensioni eccezionali.

Queste considerazioni, quindi, rendono evidente la necessità di esplorare alternative tecnologiche diverse dal pozzo piezometrico per gestire efficacemente il fenomeno del colpo d'ariete nell'impianto in questione.

## 3.3 Pozzo piezometrico ad aria compressa

### 3.3.1 Definizione e Funzionamento

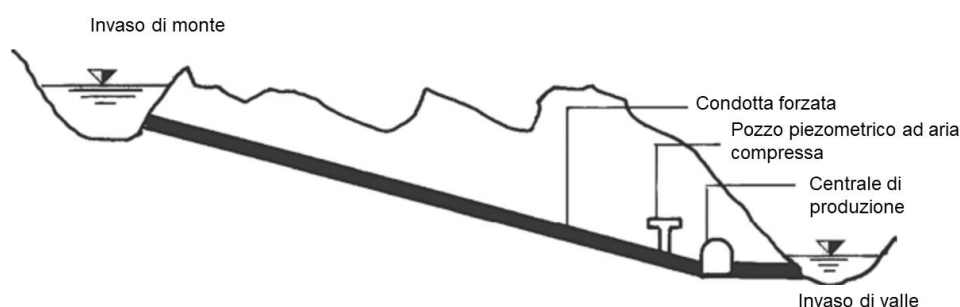
Il pozzo piezometrico ad aria compressa funziona sfruttando le proprietà dell'aria compressa come cuscino elastico. La struttura principale è simile a quella di un serbatoio piezometrico tradizionale, ma è dotata di un compartimento superiore separato dove viene mantenuta dell'aria sotto pressione. Quest'aria agisce come un cuscino elastico, che può comprimersi o espandersi in risposta alle variazioni di pressione nella condotta.

Quando si verifica un aumento rapido della pressione, ad esempio a causa della chiusura improvvisa di una valvola, l'acqua nel serbatoio spingerà contro l'aria compressa, facendola comprimere ulteriormente. Questa compressione dell'aria assorbe l'energia dell'acqua, riducendo l'effetto del colpo d'ariete. Viceversa, in caso di una diminuzione rapida della pressione, l'aria compressa si espande, spingendo l'acqua nel sistema e compensando la caduta di pressione. La chiave del funzionamento di questo sistema è la presenza dell'aria compressa, che ha proprietà elastico-compressive. Queste proprietà permettono all'aria di assorbire e rilasciare energia molto rapidamente, rendendola particolarmente efficace nel controllo delle variazioni di pressione rapide.

È importante monitorare e mantenere il livello adeguato di aria compressa nel serbatoio, perché una perdita potrebbe compromettere l'efficacia del sistema. Inoltre, la dimensione e la progettazione del serbatoio devono essere adeguatamente calcolate in base alle specifiche dell'impianto idroelettrico e alle condizioni operative previste.

### 3.3.2 Schema e Posizionamento

Il pozzo piezometrico ad aria compressa permette una gestione efficiente del colpo d'ariete, potendo essere posizionato più vicino alla centrale rispetto a un pozzo piezometrico tradizionale. Una caratteristica distintiva è che, a differenza del sistema classico, il livello dell'acqua nel serbatoio non deve corrispondere al livello massimo dell'invaso del bacino di monte, offrendo una flessibilità maggiore nella progettazione e nell'integrazione con l'ambiente circostante. Questa peculiarità si traduce in una riduzione del tratto AC (come mostrato in Figura 1), migliorando l'efficienza nella mitigazione dei fenomeni di colpo d'ariete. È anche noto come schema sistema costruttivo norvegese, uno schema è illustrato in Figura 2.



**Figura 2. Schema di un Pozzo piezometrico ad aria compressa.**

### 3.3.3 Svantaggi e limitazioni

Il pozzo piezometrico ad aria compressa, pur essendo efficace nel controllo delle variazioni di pressione, presenta alcuni svantaggi o limitazioni:

- **Manutenzione e monitoraggio:** La manutenzione del cuscino d'aria è essenziale. L'aria può dissolversi nell'acqua nel tempo, riducendo l'efficacia del sistema. Questo richiede un monitoraggio periodico e possibili rifornimenti d'aria.
- **Costi iniziali:** L'installazione di un pozzo piezometrico ad aria compressa può essere più costosa rispetto ad altre soluzioni, a causa della necessità di strutture aggiuntive per mantenere e controllare la pressione dell'aria.
- **Complessità operativa:** Il sistema richiede un controllo attento per garantire che la pressione dell'aria sia mantenuta entro limiti specificati. Questo potrebbe richiedere sistemi di monitoraggio e controllo più avanzati.
- **Dimensione e spazio:** A seconda delle specifiche dell'impianto, il serbatoio potrebbe dover essere piuttosto grande, richiedendo quindi uno spazio considerevole. Nel caso di Ruoti, questa struttura in vicinanza della centrale di produzione dovrebbe essere realizzata interamente in caverna, comportando costi di costruzione molto elevati.
- **Rischio di corrosione:** La presenza costante di aria in contatto con l'acqua può accelerare fenomeni di corrosione in alcune parti del sistema.
- **Limitazioni nella capacità di assorbimento:** Se l'evento che causa il colpo d'ariete superasse la capacità del serbatoio di assorbire l'energia, l'efficacia del sistema potrebbe non essere garantita.
- **Rischi associati alla pressione:** Se non monitorato o mantenuto correttamente, c'è il rischio che la pressione dell'aria nel serbatoio diventi troppo alta, portando a possibili guasti strutturali o altri problemi di sicurezza.

Tali svantaggi e limitazioni devono essere valutati attentamente durante la fase di progettazione, per determinare se il serbatoio piezometrico con cuscino d'aria è la soluzione più appropriata per un dato impianto idroelettrico.

### **3.3.4 Esempi di impianti simili già realizzati**

La centrale Kopwerk II, situata in Austria, rappresenta un esempio concreto e avanzato di implementazione delle soluzioni tecnologiche per la gestione del moto vario. Nell'impianto, la condotta di presa e restituzione delle acque a valle è stata equipaggiata con un pozzo piezometrico ad aria compressa. Questa soluzione ha permesso di affrontare efficacemente le problematiche legate ai fenomeni di moto vario durante le fasi di pompaggio, confermando la validità e l'efficacia di tale sistema nella pratica reale e nell'ingegneria idroelettrica moderna.

## 3.4 Bypass con valvola di sicurezza

### 3.4.1 Definizione e Funzionamento

Il sistema bypass con valvola di sicurezza rappresenta una strategia mirata per gestire i fenomeni di colpo d'ariete, garantendo la sicurezza dell'impianto e la protezione delle apparecchiature:

**Valvola Principale:** Questa valvola, posta a montante della turbina, è in grado di chiudersi nelle tempistiche necessarie nel caso di stacco di carico forzato. La chiusura controllata previene un aumento eccessivo della velocità di rotazione che potrebbe compromettere l'integrità dei macchinari.

**Bypass:** A montante della valvola principale, viene realizzato un bypass, chiuso in condizioni normali di operazione. Nel caso di stacco di carico, la valvola del bypass si apre automaticamente, permettendo all'acqua di essere derivata direttamente nel bacino di valle. Questa derivazione evita un aumento critico di pressione a montante della turbina.

**Funzionamento delle Valvole del Bypass:** Ci sono due modalità operative principali per il bypass:

- La valvola del bypass rimane aperta, e una seconda valvola, posta a valle, si chiude lentamente. Questo garantisce che l'acqua venga rilasciata in maniera controllata, producendo un colpo d'ariete di intensità ridotta.
- Oppure, la valvola del bypass è di costruzione speciale e garantisce una doppia funzionalità: si apre rapidamente per derivare l'acqua e successivamente si chiude in modo controllato, garantendo la stessa funzione della seconda valvola nel primo scenario.

### 3.4.2 Schema e Posizionamento

Nel contesto dell'impianto, il sistema bypass è strategicamente posizionato per garantire massima efficienza e protezione:

Il bypass è generalmente collocato a montante delle turbine, permettendo una derivazione diretta dell'acqua verso il bacino di valle. Questo posizionamento garantisce che, in caso di necessità, l'acqua in eccesso venga rapidamente rilasciata, bypassando il sistema di turbine, e prevenendo quindi fluttuazioni di pressione dannose. La scelta precisa della posizione dipenderà da vari fattori, tra cui la configurazione dell'impianto e le caratteristiche idrauliche del sistema.

Con questa strategia, il sistema bypass con valvola di sicurezza offre un mezzo efficace per gestire il colpo d'ariete, riducendo notevolmente i rischi associati e garantendo la longevità e la sicurezza dell'impianto idroelettrico.

### 3.4.3 Esempi di impianti simili già realizzati

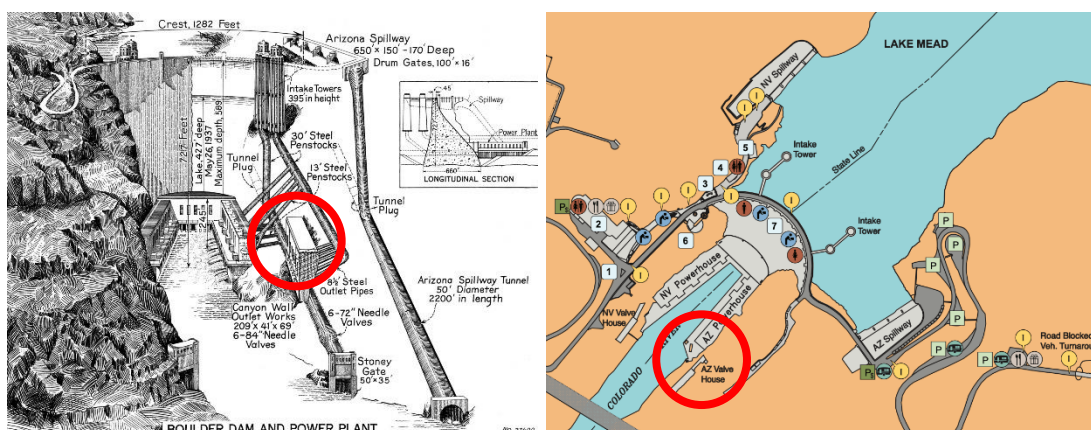
#### 3.4.3.1 Hoover Dam (Stati Uniti)

Il Hoover Dam, situato sul fiume Colorado al confine tra Arizona e Nevada, è uno degli impianti idroelettrici più iconici e storici degli Stati Uniti. Costruito tra il 1931 e il 1936, il Hoover Dam non solo fornisce energia a milioni di persone ma serve anche come importante serbatoio d'acqua attraverso il lago Mead. È una straordinaria dimostrazione di ingegneria civile e ha un impatto significativo sull'approvvigionamento idrico e sulla generazione di energia nel sudovest americano.

Nel caso di stacco di carico forzato in sequenza in fase di generazione al Hoover Dam, si attivano le valvole di sicurezza, note come Pressure Relief Valve (PRV). Queste PRV si aprono in 10 s, bypassando la turbina. Questo meccanismo permette alle valvole di chiusura a monte delle turbine di chiudersi nella stessa tempistica, proteggendo così i macchinari dall'accelerazione di una velocità di rotazione eccessiva che potrebbe causare danni. Le PRV invece chiudono lentamente, diminuendo notevolmente il Colpo d'Ariete.

Le PRV originali del Hoover Dam, datate agli anni '30, sono state recentemente sostituite e modernizzate per garantire un'operatività più sicura ed efficiente. Andritz, una delle principali aziende nel settore idroelettrico, ha avuto un ruolo fondamentale in questa modernizzazione, fornendo tecnologie all'avanguardia per ottimizzare le operazioni della centrale.

L'acqua rilasciata attraverso questo sistema di bypass viene canalizzata e indirizzata direttamente nel fiume Colorado. Questa operazione avviene attraverso strutture specifiche progettate per garantire un rilascio controllato e sicuro dell'acqua, come illustrato nella figura 2.



**Figura 3. Opere di rilascio nel Colorado River dell'acqua bypassata durante un evento di stacco di carico forzato in sequenza in fase di generazione.**

Con il suo storico significato e le recenti modernizzazioni, il Hoover Dam rimane un esempio di eccellenza nella gestione e protezione delle infrastrutture idroelettriche.

#### 3.4.3.2 Zlatoličje HPP (Slovenia)

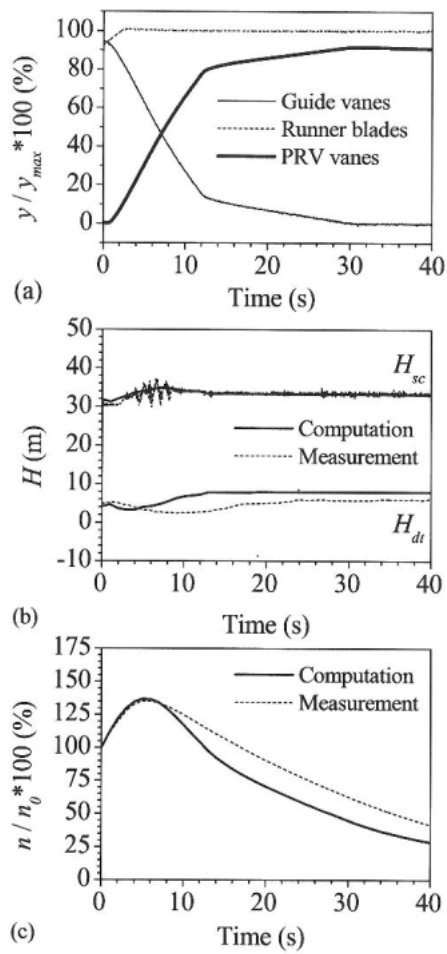
La Centrale Idroelettrica di Zlatoličje è situata in Slovenia ed è una componente chiave nella rete di generazione idroelettrica del paese. Questo impianto sfrutta le acque del fiume locale per alimentare le sue turbine Kaplan, fornendo energia rinnovabile e sostenibile alla regione circostante.

Al fine di proteggere le infrastrutture e i macchinari, la Centrale di Zlatoličje ha integrato un sistema di valvole di sicurezza per entrambe le sue turbine Kaplan. In situazioni in cui si verifica uno stacco di carico forzato in sequenza in fase di generazione, queste valvole di sicurezza entrano in azione, bypassando l'acqua direttamente nel fiume. Questo processo consente alle valvole a valle di chiudersi rapidamente, proteggendo così i macchinari da potenziali danni.

Misurazioni effettuate sull'impianto di Zlatoličje, illustrato nella Figura 4, forniscono ulteriori dettagli sul funzionamento di questo sistema di sicurezza:

- (a): Mostra che la velocità di chiusura della valvola a monte della turbina corrisponde strettamente alla velocità di apertura della valvola di sicurezza. Questa sincronizzazione garantisce una gestione fluida e sicura dell'acqua in situazioni critiche.
- (b): Evidenzia che le oscillazioni di pressione, sia a monte che a valle della turbina, si attenuano rapidamente. Importante notare che non si registrano picchi di pressione elevati, dimostrando l'efficacia del sistema nel contenere variazioni di pressione potenzialmente dannose.
- (c): Illustra che l'aumento della velocità di rotazione, rispetto alla velocità nominale, non supera il +25%. Questo è indicativo dell'efficacia del sistema nel prevenire accelerazioni dannose.





**Figura 4. Misurazioni effettuate sull'impianto di Zlatoličje: (a) Chiusura/apertura delle pale della girante e delle valvole di sicurezza, (b) Pressione a monte e valle della turbina, (c) numero dei giri.**

In Figura 5 si vede il rilascio dell'acqua bypassata durante un evento di stacco di carico forzato in sequenza in fase di generazione.





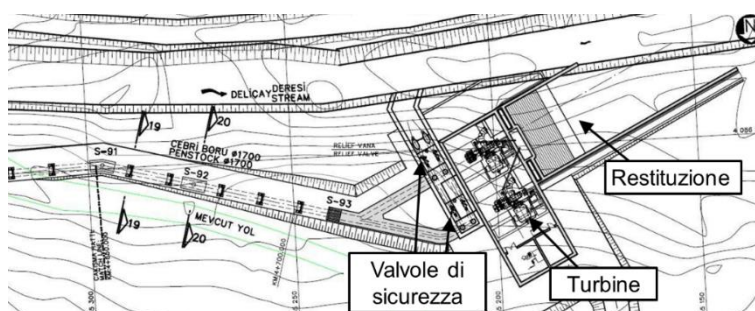
**Figura 5. Rilascio dell'acqua bypassata durante un evento.**

La Centrale Idroelettrica di Zlatoličje rappresenta un esempio notevole di come la tecnologia moderna possa essere utilizzata per proteggere le infrastrutture critiche in condizioni operative difficili.

### 3.4.3.3 Yesilvadi HPP (Turchia)

La Centrale Idroelettrica di Yesilvadi, situata in Turchia, svolge un ruolo cruciale nella produzione di energia elettrica per la regione circostante. Questo impianto sfrutta la potenza del flusso d'acqua per alimentare due turbine Francis con assi orizzontali.

Le condotte che conducono alle turbine sono dotate di ben quattro valvole di sicurezza, due per ciascuna tubazione. Inoltre, esiste un'ulteriore valvola posizionata sulla condotta principale, prima della sua diramazione verso le due turbine (Figura 6). Queste valvole di sicurezza hanno una struttura e un funzionamento leggermente differenti rispetto agli esempi precedenti. Vantano un tempo di reazione estremamente rapido, ma sono anche progettate per operare con aperture parziali, modulate in base alle variazioni di pressione. La presenza di due valvole per condotta, oltre a quella sulla linea principale, garantisce che certi livelli di pressione non vengano mai superati. Questo particolare meccanismo di azione è gestito da un sofisticato sistema meccanico.



**Figura 6. Planimetria centrale Yesilvadi HPP.**

È stato condotto uno studio numerico per valutare l'efficacia di queste valvole di sicurezza confrontandolo con un sistema privo delle stesse. I risultati dell'analisi sono stati significativi: le valvole attivano il bypass molto rapidamente, entro 1 s, limitando efficacemente il colpo d'ariete. Importante sottolineare che l'analisi ha confermato che l'implementazione di queste valvole non introduce ulteriori colpi d'ariete nel sistema. Per minimizzare ulteriormente l'impatto di eventuali colpi d'ariete secondari, si è osservato che una chiusura graduale delle valvole contribuisce a ridurre l'entità di tali eventi.

La Centrale Idroelettrica di Yesilvadi dimostra come l'innovazione e la progettazione accurata possano migliorare significativamente la gestione del colpo d'ariete, garantendo al contempo la sicurezza e la protezione delle infrastrutture critiche.

#### 3.4.3.4 Altri esempi

Altre centrali idroelettriche, in cui vengono applicate soluzioni di questo tipo per la gestione del colpo d'Ariete, sono:

- Limberg I (Austria);
- Rodundwerk I (Austria);
- Tonstad (Norvegia).

### 3.5 Scelta della variante progettuale

Per l'impianto di Ruoti, dopo un'attenta analisi delle opzioni disponibili e tenendo conto delle peculiarità e delle limitazioni del sito, è stata selezionata la soluzione del sistema bypass con valvola di sicurezza. Considerazioni e motivazioni per la scelta:

- **Limitazioni topografiche e costruttive:** La configurazione topografica della zona di Ruoti presenta delle sfide significative. La mancanza di un tratto iniziale con minima pendenza prima di entrare in una condotta forzata ripida rende impraticabile la realizzazione di un pozzo piezometrico classico. Inoltre, non vi è un punto idoneo lungo la condotta forzata dove poter inserire un pozzo piezometrico senza la necessità di opere superficiali che avrebbero un forte impatto paesaggistico o che risulterebbero non fattibili dal punto di vista costruttivo.
- **Analisi economica:** La possibilità di adottare un pozzo piezometrico ad aria compressa è stata valutata. Tuttavia, la necessità di realizzare interamente tale sistema in caverna avrebbe comportato costi di costruzione significativamente elevati. Oltre ai costi diretti di realizzazione, ci sarebbero state implicazioni operative che avrebbero reso il sistema complesso dal punto di vista gestionale e di manutenzione.

- **Semplicità operativa del sistema bypass con valvola di sicurezza:** La scelta di optare per il sistema bypass con valvola di sicurezza non solo risolve i problemi associati al colpo d'ariete, ma offre anche una soluzione robusta e relativamente semplice da gestire. La sua natura meccanica e il design consolidato assicurano che, in caso di interruzioni o fluttuazioni del carico, l'acqua possa essere rapidamente deviata, proteggendo così l'infrastruttura e garantendo una gestione sicura dell'impianto.

In conclusione, date le circostanze uniche e le sfide associate al sito di Ruoti, il sistema bypass con valvola di sicurezza rappresenta la scelta più logica e praticabile. Questa decisione è stata presa tenendo conto sia delle esigenze tecniche che economiche, assicurando che l'impianto sia non solo funzionale ma anche economicamente sostenibile nel lungo termine.

## 4. Valutazioni idrauliche

### 4.1 Calcoli idraulici e dimensionamento condotte senza mitigazioni per il Colpo d'Ariete

All'interno di questo capitolo vengono presentati i dettagli relativi ai calcoli idraulici eseguiti per dimensionare le condotte, considerando l'assenza di misure mitigative per il colpo d'ariete.

#### 4.1.1 Calcolo delle sovrapressioni dinamiche

Utilizzando i metodi descritti nel Capitolo 2.2 - in particolare i metodi di Joukovsky, Michaud/Allievi, Metodo di Budau e il metodo della Colonna d'acqua rigida - sono state stimate le sovrapressioni dinamiche senza misure di mitigazione per i fenomeni di moto vario. Queste sono state calcolate assumendo un tempo di chiusura delle valvole a monte delle turbine di 15 s nel caso di stacco di carico forzato in sequenza durante la fase di generazione. I risultati ottenuti sono presentati nella Tabella 1. Per ulteriori dettagli sui valori assunti durante queste simulazioni, si fa riferimento all'Appendice 1.

|                               | applicazione | $\Delta h$ [mWs] | $\Delta p$ [bar] |
|-------------------------------|--------------|------------------|------------------|
| <b>Joukovsky</b>              | non valido   | 555              | 57               |
| <b>Michaud/Allievi</b>        | ok           | 275              | 28               |
| <b>Budau</b>                  | ok           | 206              | 21               |
| <b>Colonna d'acqua rigida</b> | non valido   | 137              | 14               |

**Tabella 1. Risultati delle sovrapressioni calcolate con vari metodi (senza misure di mitigazione per i fenomeni di moto vario).**

#### 4.1.2 Calcolo delle pressioni per il dimensionamento della condotta

Sono state determinate le seguenti pressioni chiave:

- **Pressione di Servizio (SP):** Pressione interna disponibile della zona di pressione fissata dal progettista a portata zero nella tubazione;
- **Pressione di Progetto (DP):** Pressione di esercizio massima della zona di pressione fissata dal progettista considerando gli sviluppi futuri ma escludendo il Colpo d'Ariete;
- **Pressione Massima di Progetto con Colpo d'Ariete (MDPc):** Pressione di esercizio massima della zona di pressione fissata dal progettista considerando gli sviluppi futuri e includendo il Colpo d'Ariete calcolato;
- **Pressione di Prova del Sistema (STP):** Pressione idrostatica della zona di pressione fissata dal progettista applicata a una condotta di nuovo posa in opera al fine di assicurarne integrità e tenuta.

I risultati ottenuti sono elencati nella Tabella 2. È importante notare che la condotta forzata è stata suddivisa in sei tratti, ognuno dei quali ha una differenza di altitudine tra il punto più basso e il punto più alto simile. Questo approccio consente di ottimizzare lo spessore delle condotte con pressioni decrescenti, realizzando un significativo risparmio di materiale.

| Tratto di condotta [m.s.l.m]  | 1.065 - 975 | 975 - 868 | 868 - 761 | 761 - 654 | 654 - 547 | 547 - 440 |
|---|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Quota minima tratto [m.s.l.m]   | 440         | 547       | 654       | 761       | 868       | 975       |
| Quota massima invaso monte [m.s.l.m]                                      | 1080,64     | 1080,64   | 1080,64   | 1080,64   | 1080,64   | 1080,64   |
| Salto lordo [m]   | 640,65      | 533,64    | 426,64    | 319,64    | 212,64    | 105,64    |
| Perdite di carico [m]   | 16,21       | 13,51     | 10,81     | 8,11      | 5,40      | 2,70      |
| Accelerazione di gravità [N/m³]   | 9810        | 9810      | 9810      | 9810      | 9810      | 9810      |
| Pressione di servizio SP [bar]  | 62,8        | 52,4      | 41,9      | 31,4      | 20,9      | 10,4      |
| Pressione di progetto DP [bar]  | 61,3        | 51,0      | 40,8      | 30,6      | 20,3      | 10,1      |
| Pressione massima di progetto (con calcolo del Colpo d'Ariete) MDPc [bar] | 89,3        | 79,0      | 68,8      | 58,6      | 48,4      | 38,1      |
| Pressione di prova del sistema STP [bar]                                  | 90,3        | 80,0      | 69,8      | 59,6      | 49,4      | 39,1      |

**Tabella 2. Pressioni chiave per i sei tratti della condotta forzata (senza misure di mitigazione per i fenomeni di moto vario).**

#### 4.1.3 Dimensionamento degli spessori della condotta forzata

Per il dimensionamento degli spessori delle condotte, sono state utilizzate due norme di riferimento: DIN2413 e EN13480-3.

- DIN 2413: Questa norma dettaglia le specifiche per la progettazione di tubi sottoposti a pressione interna, considerando principalmente le tensioni dovute alla pressione.
- EN 13480-3: Si tratta di una norma che stabilisce i requisiti per la progettazione di sistemi di tubazioni metallici industriali soggetti a pressioni.

Basandosi su queste norme, sono stati determinati gli spessori delle condotte. I risultati per ciascuno dei sei tratti sono riportati nella Tabella 3. Tutti i calcoli dettagliati possono essere consultati nell'Appendice 1.

| classe di pressione |         | PN40        | PN50      | PN60      | PN70      | PN80      | PN90      |
|---------------------|---------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| sezione             | m s.l.m | 1.065 - 975 | 975 - 868 | 868 - 761 | 761 - 654 | 654 - 547 | 547 - 440 |
| spessore effettivo  | mm      | 59          | 59        | 65        | 76        | 87        | 99        |

**Tabella 3. Spessori necessari per i sei tratti della condotta forzata (senza misure di mitigazione per i fenomeni di moto vario).**

Concludendo, questo capitolo ha presentato una panoramica dettagliata dei calcoli idraulici effettuati per il dimensionamento delle condotte, considerando la presenza del fenomeno del colpo d'ariete e senza misure di mitigazione. I risultati ottenuti dimostrano la necessità di prevedere una opera di attenuazione di fenomeni di moto vario per ridurre gli spessori necessari siccome si tratta di valori altissimi.

## 4.2 Opera di attenuazione di fenomeni di moto vario

La gestione dei fenomeni di moto vario è cruciale in un impianto idroelettrico. Tali fenomeni, se non controllati, possono causare danni strutturali e malfunzionamenti nell'apparecchiatura. Con questo in mente, nell'ambito del presente progetto sono state prese decisioni chiave per assicurare che questi fenomeni vengano efficacemente mitigati e gestiti.

Conforme a quanto delineato nel capitolo 3, la scelta progettuale si è indirizzata verso l'adozione del sistema di bypass con valvola di sicurezza. Questa soluzione garantisce che, nel caso di eventi inaspettati come lo stacco di carico forzato in sequenza durante la fase di generazione, l'acqua possa essere deviata in modo sicuro, evitando sovrappressioni o danni ai macchinari garantendo una chiusura immediata e rapida (10-15 s) delle valvole a monte delle turbine.

Al punto 4+445 della condotta forzata, è stata realizzata una diramazione con un diametro nominale di DN3200 per fungere da bypass. In questo specifico punto, si è prevista la costruzione di un locale per le valvole. Due valvole sono state inserite sulla diramazione: la prima, quella a monte, è una valvola di sicurezza PRV progettata per rimanere chiusa durante il normale funzionamento dell'impianto. Questa valvola si apre in un tempo di 10 s nel caso di stacco di carico forzato in sequenza durante la fase di generazione, garantendo un flusso sicuro dell'acqua. La seconda valvola, quella a valle nel bypass, è una valvola a sfera che, durante il normale funzionamento dell'impianto rimane aperta. Tuttavia, in caso stacco di carico forzato in sequenza durante la fase di generazione, si chiude lentamente in un tempo di 60 s, garantendo una chiusura graduale e controllata del flusso.





a un volume totale d'acqua rilasciato nell'invaso di circa 1.300 m<sup>3</sup> in seguito a un evento di stacco di carico. Prima di ogni riavvio dell'impianto, è fondamentale assicurarsi che le valvole siano riportate alla loro posizione iniziale. Questo garantisce che l'intero sistema funzioni come previsto, riducendo i rischi e garantendo la sicurezza dell'operazione. In Figura 7 e Figura 8 si intravedono la soluzione adottata in planimetria e sezione longitudinale.

### 4.3 Calcoli idraulici e dimensionamento della condotta considerando l'opera di attenuazione di fenomeni di moto vario

#### 4.3.1 Calcolo delle sovrappressioni dinamiche

Utilizzando i metodi descritti nel Capitolo 2.2 - in particolare i metodi di Joukovsky, Michaud/Allievi, Metodo di Budau e il metodo della Colonna d'acqua rigida - sono state stimate le sovrappressioni dinamiche con la misura di mitigazione per i fenomeni di moto vario come descritta in capitolo 4.2. Queste sono state calcolate assumendo un tempo di chiusura di 60 s nel caso di stacco di carico forzato in sequenza durante la fase di generazione. I risultati ottenuti sono presentati nella Tabella 4. Per ulteriori dettagli sui valori assunti durante queste simulazioni, si fa riferimento all'Appendice 2.

|                               | applicazione | $\Delta h$ [mWs] | $\Delta p$ [bar] |
|-------------------------------|--------------|------------------|------------------|
| <b>Joukovsky</b>              | non valido   | 555              | 57               |
| <b>Michaud/Allievi</b>        | ok           | 69               | 7                |
| <b>B dau</b>                  | ok           | 52               | 5                |
| <b>Colonna d'acqua rigida</b> | non valido   | 34               | 4                |

**Tabella 4. Risultati delle sovrappressioni calcolate con vari metodi (con misure di mitigazione per i fenomeni di moto vario).**

#### 4.3.2 Calcolo delle pressioni per il dimensionamento della condotta

Sono state determinate le seguenti pressioni chiave, come in capitolo 4.1.2. I risultati ottenuti sono elencati nella Tabella 5. La suddivisione in sei tratti rimane uguale come in capitolo 4.1.2.

| Tratto di condotta [m.s.l.m]  | 1.065 - 975 | 975 - 868 | 868 - 761 | 761 - 654 | 654 - 547 | 547 - 440 |
|---|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Quota minima tratto [m.s.l.m]   | 440         | 547       | 654       | 761       | 868       | 975       |
| Quota massima invaso monte [m.s.l.m]                                      | 1080,64     | 1080,64   | 1080,64   | 1080,64   | 1080,64   | 1080,64   |
| Salto lordo [m]   | 640,65      | 533,64    | 426,64    | 319,64    | 212,64    | 105,64    |
| Perdite di carico [m]   | 16,21       | 13,51     | 10,81     | 8,11      | 5,40      | 2,70      |
| Accelerazione di gravità [N/m³]   | 9810        | 9810      | 9810      | 9810      | 9810      | 9810      |
| Pressione di servizio SP [bar]  | 62,8        | 52,4      | 41,9      | 31,4      | 20,9      | 10,4      |
| Pressione di progetto DP [bar]  | 61,3        | 51,0      | 40,8      | 30,6      | 20,3      | 10,1      |
| Pressione massima di progetto (con calcolo del Colpo d'Ariete) MDPc [bar] | 68,3        | 58,0      | 47,8      | 37,6      | 27,3      | 17,1      |
| Pressione di prova del sistemaSTP [bar]                                   | 69,3        | 59,0      | 48,8      | 38,6      | 28,3      | 18,1      |

**Tabella 5. Pressioni chiave per i sei tratti della condotta forzata (con misure di mitigazione per i fenomeni di moto vario).**

#### 4.3.3 Dimensionamento degli spessori della condotta

Per il dimensionamento degli spessori delle condotte, sono state utilizzate due norme di riferimento: DIN2413 e EN13480-3.

- DIN 2413: Questa norma dettaglia le specifiche per la progettazione di tubi sottoposti a pressione interna, considerando principalmente le tensioni dovute alla pressione.
- EN 13480-3: Si tratta di una norma che stabilisce i requisiti per la progettazione di sistemi di tubazioni metallici industriali soggetti a pressioni.

Basandosi su queste norme, sono stati determinati gli spessori delle condotte. I risultati per ciascuno dei sei tratti sono riportati nella Tabella 6. Tutti i calcoli dettagliati possono essere consultati nell'Appendice 2.

| classe di pressione |         | PN20        | PN30      | PN40      | PN50      | PN60      | PN70      |
|---------------------|---------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| sezione             | m s.l.m | 1.065 - 975 | 975 - 868 | 868 - 761 | 761 - 654 | 654 - 547 | 547 - 440 |
| spessore effettivo  | mm      | 20          | 31        | 42        | 53        | 64        | 75        |

**Tabella 6. Spessori necessari per i sei tratti della condotta forzata (con misure di mitigazione per i fenomeni di moto vario).**

In confronto agli spessori necessari senza opere di mitigazione di moto vario, con l'opera proposta per la mitigazione dei fenomeni di moto vario, si raggiunge una riduzione notevole degli spessori necessari nei sei tratti della condotta forzata.

#### 4.3.4 Vantaggi

L'implementazione di questa soluzione ha diversi vantaggi, che vanno dal miglioramento delle prestazioni strutturali e idrauliche, alle considerazioni economiche e ambientali:

- Dal punto di vista idraulico e strutturale: la scelta dell'opera di mitigazione proposta offre una significativa riduzione delle sovrappressioni dinamiche. Questo non solo garantisce una



maggiore sicurezza strutturale dell'intero sistema, ma anche minimizza il rischio di danni ai macchinari, in particolare evitando incrementi pericolosi del numero di giri delle turbine. In sostanza, questo aumenta la resilienza del sistema ai cambiamenti dinamici e ai possibili eventi di emergenza.

- Dal punto di vista economico: l'efficienza in termini di materiali utilizzati si riflette in una riduzione tangibile dei costi. Basandosi sui calcoli proposti, considerando il peso dell'acciaio necessario e moltiplicando la superficie di sezione dei vari tratti per la loro lunghezza, con un'assunzione di densità di 7,87 t/m<sup>3</sup>, si ottiene un risparmio considerevole di 11.600 t di acciaio, corrispondente a una diminuzione del 37% rispetto a una soluzione senza opera di mitigazione (Tabella 7).
- Dal punto di vista ambientale: il risparmio di acciaio non solo si traduce in un vantaggio economico, ma anche in un beneficio ambientale. Infatti, meno acciaio prodotto significa una minore emissione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera. Con l'assunzione che la produzione di una tonnellata di acciaio porti all'emissione di 1,45 t di CO<sub>2</sub>, si stima un risparmio di 17. t di "embodied CO<sub>2</sub>". L'"embodied CO<sub>2</sub>" fa riferimento alla quantità di CO<sub>2</sub> emessa durante il ciclo di vita di un materiale, dalla sua produzione alla sua fine vita. Questo concetto prende in considerazione tutte le emissioni associate alla produzione, al trasporto, all'installazione e allo smaltimento del materiale. Questo tipo di analisi è fondamentale per avere una visione olistica dell'impatto ambientale dei materiali utilizzati in un progetto (Tabella 7).

In conclusione, l'opera di mitigazione proposta offre non solo vantaggi in termini di sicurezza e funzionalità dell'impianto, ma anche un approccio sostenibile dal punto di vista economico e ambientale, rafforzando così la sua valenza nell'ambito del progetto complessivo.

| Sezione [m s.l.m.]  | 1.065 - 975 | 975 - 868 | 868 - 761 | 761 - 654 | 654 - 547 | 547 - 440 | totale        |
|---|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Spessore effettivo (senza opera di attenuazione di "moto vario") [mm]     | 59          | 59        | 65        | 76        | 87        | 99        |               |
| Peso acciaio necessario (senza opera di attenuazione di "moto vario") [t] | 4.200       | 4.200     | 4.600     | 5.400     | 6.200     | 7.000     | <b>31.600</b> |
| Spessore effettivo (con opera di attenuazione di "moto vario") [mm]       | 20          | 31        | 42        | 53        | 64        | 75        |               |
| Peso acciaio necessario (con opera di attenuazione di "moto vario") [t]   | 1.400       | 2.200     | 2.900     | 3.700     | 4.500     | 5.300     | <b>20.000</b> |
| Risparmio acciaio [t]   | 2.800       | 2.000     | 1.700     | 1.700     | 1.700     | 1.700     | <b>11.600</b> |
| Risparmio acciaio [%]   | -67%        | -48%      | -37%      | -31%      | -27%      | -24%      | -37%          |
| Risparmio embodied CO <sub>2</sub> [t]                                    | 4.100       | 2.900     | 2.500     | 2.500     | 2.500     | 2.500     | <b>17.000</b> |

**Tabella 7. Confronto del fabbisogno di acciaio per la condotta forzata senza e con misure di mitigazione per i fenomeni di moto vario.**

#### 4.3.5 Ulteriori approfondimenti in fase di progettazione esecutiva

In fase di progettazione esecutiva, l'attenzione e la cura ai dettagli sono essenziali per garantire la sicurezza e l'efficienza dell'intero sistema idroelettrico.

- **Analisi dettagliate dei transitori:** Durante la progettazione definitiva, in collaborazione con il fornitore o i fornitori selezionati, è imprescindibile svolgere simulazioni numeriche dettagliate per analizzare i fenomeni transitori. L'analisi dei transitori si occupa dello studio dei cambiamenti rapidi e temporanei che avvengono in un sistema in risposta a variazioni improvvisi, come una chiusura o apertura di valvole. Queste simulazioni permettono di anticipare e comprendere le risposte dell'impianto a tali variazioni, garantendo che le opere idrauliche progettate, in combinazione con i macchinari, funzionino come previsto, in particolare modo la turbina, il generatore, le valvole e l'opera di attenuazione dei fenomeni di moto vario.
- **Ottimizzazione delle valvole:** Le due valvole, previste per l'opera di attenuazione dei fenomeni di moto vario, potrebbero necessitare di ulteriori affinamenti nel design. È probabile che sia necessario avviare un processo iterativo di progettazione, collaborando strettamente con i fornitori, per affinare la soluzione e garantire che l'opera funzioni come previsto.
- **Studio con modello idraulico di dettaglio:** È fortemente consigliato avviare uno studio basato su un modello idraulico dell'opera proposta. Questo approccio offre la possibilità di verificare in modo dettagliato e accurato la corretta funzionalità del sistema idraulico in presenza dell'opera di attenuazione dei fenomeni di moto vario. Un modello idraulico fisico può replicare, su scala ridotta, le condizioni operative reali, permettendo di anticipare possibili problematiche o inefficienze e di apportare le necessarie modifiche prima dell'implementazione su larga scala.

In sintesi, la fase di progettazione esecutiva richiede un'analisi meticolosa e approfondita, basata sulla combinazione di simulazioni numeriche, ottimizzazione dei componenti e modellazione idraulica, per assicurare la massima efficienza e sicurezza dell'impianto.

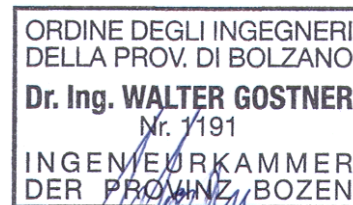
## 5. Conclusioni

Per garantire un funzionamento sicuro ed efficiente di qualsiasi impianto idraulico, uno studio approfondito dei fenomeni di moto vario si rivela non solo necessario ma imprescindibile. Nel contesto del progetto in esame, sono state valutate diverse strategie atte a mitigare le sovrappressioni indotte dal Colpo d'Ariete, fenomeno particolarmente critico in eventi come lo stacco di carico forzato in sequenza durante la fase di generazione. Dopo un'attenta analisi, per l'impianto di Ruoti, la soluzione del bypass con valvola di sicurezza si è distinta come la più adatta alle esigenze specifiche. Questo approccio, oltre a garantire una gestione ottimale dei picchi di pressione, ha offerto il vantaggio di consentire una significativa riduzione degli spessori della condotta forzata, rappresentando una soluzione efficace e conveniente rispetto a un sistema senza misure di mitigazione. Inoltre, questo sistema è affidabile e utilizzato in molti altri impianti già in funzione.

Bolzano, Malles, lì 28.09.2023

Il Tecnico

Dr. Ing. Walter Gostner

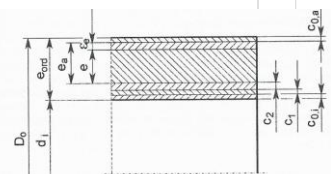


## Appendice 1

| <b>Determinazione del Colpo di ariete (senza misure di mitigazione)</b> |  |  |            |
|---|--|--|------------|
| salto lordo [m]   |  |  | 598,5      |
| perdite distribuite [m]   |  |  | 16,21      |
| salto netto [m]   |  |  | 582,29     |
| lunghezza condotta forzata [m]  |  |  | 4550       |
| diametro interno [mm]   |  |  | 3500       |
| velocità di propagazione [m/s]  |  |  | 1225       |
| tempo di chiusura [s]   |  |  | 15         |
| portata al tempo di chiusura [l/s]                                      |  |  | 42770      |
| numero di condotte [-]  |  |  | 1          |
| portata a seguito della chiusura [l/s]                                  |  |  | 0          |
| variazione di portata [l/s]   |  |  | 42770      |
| velocità al tempo zero [m/s]  |  |  | 4,45       |
| variazione della velocità [m/s]   |  |  | 4,45       |
| tempo di riflessione [s]  |  |  | 7,43       |
| tempo di amplitudo [s]  |  |  | 14,86      |
| <b>varie formule classiche in funzione di t s</b>                       |  |  |            |
| <b>Joukovsky</b>  |  |  |            |
|   |  |  | non valido |
| sovrapressione dinamica   | $\Delta h$ [mWs]   |  | 555        |
|   | $\Delta p$ [bar]   |  | 56,6       |
|   | $\Delta p$ [N/mm <sup>2</sup> ]                                    |  | 5,66       |
| <b>Michaud/Allievi</b>  |  |  |            |
| per   | tempo di riflessione < tempo di chiusura < 10 x tempo di riflessio |  | ok         |
| sovrapressione dinamica   | $\Delta h$ [mWs]   |  | 275        |
|   | $\Delta p$ [bar]   |  | 28,0       |
|   | $\Delta p$ [N/mm <sup>2</sup> ]                                    |  | 2,80       |
| <b>Budau</b>  |  |  |            |
| per   |  |  | ok         |
| sovrapressione dinamica   | $\Delta h$ [mWs]   |  | 206        |
|   | $\Delta p$ [bar]   |  | 21,0       |
|   | $\Delta p$ [N/mm <sup>2</sup> ]                                    |  | 2,10       |
| <b>Colonna d'acqua rigida</b>   |  |  |            |
| per   | tempo di chiusura >> tempo di riflessione                          |  | non valido |
| sovrapressione dinamica   | $\Delta h$ [mWs]   |  | 137        |
|   | $\Delta p$ [bar]   |  | 14,0       |
|   | $\Delta p$ [N/mm <sup>2</sup> ]                                    |  | 1,40       |

| Dimensionamento considerando la pressione interna secondo DIN 2413   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
|--|----------------------|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| classe di pressione  |                      |         | PN40          | PN50          | PN60          | PN70          | PN80          | PN90          |
| sezione  |                      | m.s.l.m | 1.065 - 975   | 975 - 868     | 868 - 761     | 761 - 654     | 654 - 547     | 547 - 440     |
| <b>caratteristiche dei materiali</b>   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| materiale  |                      |         | Stahl / steel | Stahl / steel | Stahl / steel | Stahl / steel | Stahl / steel | Stahl / steel |
| classe di acciaio  |                      |         | S355          | S355          | S355          | S355          | S355          | S355          |
| tensione di snervamento  |                      | N/mm²   | 355           | 355           | 355           | 355           | 355           | 355           |
| diametro esterno   | d <sub>a</sub>       | mm      | 3618          | 3618          | 3630          | 3652          | 3674          | 3698          |
| qualità della saldatura  |                      | -       | 0,85          | 0,85          | 0,85          | 0,85          | 0,85          | 0,85          |
| fattore di sicurezza   | S                    | -       | 1,6           | 1,6           | 1,6           | 1,6           | 1,6           | 1,6           |
| tensione ammissibile   | σ <sub>zul</sub>     | N/mm²   | 221,88        | 221,88        | 221,88        | 221,88        | 221,88        | 221,88        |
| modulo elastico  | E                    | N/mm²   | 210000        | 210000        | 210000        | 210000        | 210000        | 210000        |
| modulo di Poisson  | μ                    | -       | 0,3           | 0,3           | 0,3           | 0,3           | 0,3           | 0,3           |
| <b>carichi</b>   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| colpo d'ariete   | ΔP                   | N/mm²   | 2,80          | 2,80          | 2,80          | 2,80          | 2,80          | 2,80          |
| pressione di prova (STP) in bar  | STP                  | bar     | <b>39,12</b>  | <b>49,35</b>  | <b>59,59</b>  | <b>69,82</b>  | <b>80,05</b>  | <b>90,28</b>  |
| pressione di prova (STP)   | STP                  | N/mm²   | 3,91          | 4,94          | 5,96          | 6,98          | 8,00          | 9,03          |
| limite superiore dell'ampiezza   | p <sub>i,So</sub>    | N/mm²   | 3,81          | 4,84          | 5,86          | 6,88          | 7,90          | 8,93          |
| limite inferiore dell'ampiezza   | p <sub>i,Su</sub>    | N/mm²   | -1,79         | -0,77         | 0,25          | 1,28          | 2,30          | 3,32          |
| <b>spessore esito dal calcolo per sollecitazioni statiche e termiche fino a 120°C</b>  |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| spessore del tubo  | s <sub>v</sub>       | mm      | 37,53         | 47,34         | 57,34         | 67,60         | 77,97         | 88,51         |
| <b>per sollecitazioni dinamiche (a.e. colpo d'ariete)</b>  |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| numero dei cicli di carico   | n                    | -       | 3000          | 3000          | 3000          | 3000          | 3000          | 3000          |
| resistenza alla trazione   | σ <sub>b</sub>       | N/mm²   | 490           | 490           | 490           | 490           | 490           | 490           |
| resistenza a fatica  | σ <sub>Sch,f</sub>   | N/mm²   | 490           | 490           | 490           | 490           | 490           | 490           |
| fattore di sicurezza   | S <sub>D</sub>       | -       | 2,5           | 2,5           | 2,5           | 2,5           | 2,5           | 2,5           |
| sollecitazione di fatica   | σ <sub>zul,z</sub>   | N/mm²   | 196,00        | 196,00        | 196,00        | 196,00        | 196,00        | 196,00        |
| spessore   | s <sub>v</sub>       | mm      | 52,48         | 52,48         | 52,65         | 52,97         | 53,29         | 53,64         |
| addizionale per considerare tolleranze di produzione   | c <sub>1</sub>       | %       | 2             | 2             | 2             | 2             | 2             | 2             |
| addizionale per contrastare la corrosione  | c <sub>2</sub>       | mm      | 1,5           | 1,5           | 1,5           | 1,5           | 1,5           | 1,5           |
| $s = s_v + c_1 + c_2 = (s_v + c_2) \cdot \frac{100}{100 - c_1}$ [mm]   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| <b>spessore necessario</b>   | mm                   |         | <b>55,08</b>  | <b>55,08</b>  | <b>60,04</b>  | <b>70,51</b>  | <b>81,09</b>  | <b>91,85</b>  |
| <b>spessore effettivo</b>  | mm                   |         | <b>59,00</b>  | <b>59,00</b>  | <b>65,00</b>  | <b>76,00</b>  | <b>87,00</b>  | <b>99,00</b>  |
| <b>deformazione radiale sotto carichi esterni</b><br>(secondo l'AD-Merkblatt B6)   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| <b>Determinazione della sovrappressione esterna ammissibile</b>  |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| <b>condizioni di carico deformazione radiale elastica</b>  |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| fattore di sicurezza   | S <sub>K</sub>       | -       | 3             | 3             | 3             | 3             | 3             | 3             |
| pressione critica ammissibile  | p <sub>krit,el</sub> | N/mm²   | 0,470         | 0,470         | 0,607         | 0,976         | 1,471         | 2,110         |
| <b>condizioni di carico deformazione radiale plastica</b>  |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| fattore di sicurezza   | S                    | -       | 2,6           | 2,6           | 2,6           | 2,6           | 2,6           | 2,6           |
| pressione critica ammissibile  | p <sub>krit,pl</sub> | N/mm²   | 3,96          | 3,96          | 4,31          | 5,05          | 5,80          | 6,54          |
| $p_{\text{crit,el}} = \frac{2 \cdot E_R \cdot s_v^2}{S_K \cdot (1 - \mu^2) \cdot d_a^2}$ [N/mm²]   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| $p_{\text{crit,pl}} = \frac{2 \cdot K \cdot s_v}{S \cdot d_a} \left( 1 + \frac{1,5 \cdot d_a \cdot (1 - 0,2 \cdot d_a / l) \cdot d_a}{100 \cdot s_v} \right)^{-1}$ [N/mm²] |                      |         |               |               |               |               |               |               |

| Dimensionamento di condotte in acciaio soggette a pressione interna e forze assiali<br>secondo la norma DIN EN 13480-3 |                    |                   |           |           |           |           |           |
|--|--------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| classe di pressione  |                    | PN40              | PN50      | PN60      | PN70      | PN80      | PN90      |
| <b>sezione</b>   | ms.l.m             | 1.065 - 975       | 975 - 868 | 868 - 761 | 761 - 654 | 654 - 547 | 547 - 440 |
| <b>caratteristiche dei materiali</b>   |                    |                   |           |           |           |           |           |
| resistenza a trazione minima a temperatura ambiente  | R <sub>m</sub>     | N/mm <sup>2</sup> | 500,00    | 500,00    | 500,00    | 500,00    | 500,00    |
| tensione di snervamento  | R <sub>p0,2t</sub> | N/mm <sup>2</sup> | 355,00    | 355,00    | 355,00    | 355,00    | 355,00    |
| qualità della saldatura  | z                  | -                 | 0,85      | 0,85      | 0,85      | 0,85      | 0,85      |
| <b>geometria della condotta</b>  |                    |                   |           |           |           |           |           |
| diametro esterno   | D <sub>O</sub>     | mm                | 3618,00   | 3618,00   | 3630,00   | 3652,00   | 3674,00   |
| diametro interno   | d <sub>i</sub>     | mm                | 3500,00   | 3500,00   | 3500,00   | 3500,00   | 3500,00   |
| <b>tensioni ammissibili</b>  |                    |                   |           |           |           |           |           |
| fattore di sicurezza   | S1                 | -                 | 1,50      | 1,50      | 1,50      | 1,50      | 1,50      |
|  |                    |                   | 236,7     | 236,7     | 236,7     | 236,7     | 236,7     |
|  | S2                 | -                 | 2,40      | 2,40      | 2,40      | 2,40      | 2,40      |
|  |                    |                   | 208,3     | 208,3     | 208,3     | 208,3     | 208,3     |
| tensioni ammissibili   | f                  | N/mm <sup>2</sup> | 208,33    | 208,33    | 208,33    | 208,33    | 208,33    |
| <b>ipotesi di carico</b>   |                    |                   |           |           |           |           |           |
| pressione di prova (STP)   | p <sub>i</sub>     | N/mm <sup>2</sup> | 3,91      | 4,94      | 5,96      | 6,98      | 8,00      |
| <b>equazioni elementari</b>  |                    |                   |           |           |           |           |           |
| diametro considerato d (d <sub>i</sub> ≤ d ≤ D <sub>O</sub> )  | d                  | mm                | 3559,00   | 3559,00   | 3565,00   | 3576,00   | 3599,00   |
| tensione radiale   | σ <sub>r</sub>     | N/mm <sup>2</sup> | -1,91     | -2,41     | -2,90     | -3,38     | -3,86     |
| tensione tangenziale   | σ <sub>t</sub>     | N/mm <sup>2</sup> | 116,02    | 146,37    | 160,39    | 160,73    | 160,97    |
| tensione assiale   | σ <sub>a</sub>     | N/mm <sup>2</sup> | 57,06     | 71,98     | 78,75     | 78,67     | 77,60     |
| <b>tensioni equivalenti</b>  |                    |                   |           |           |           |           |           |
| <b>ipotesi della sollecitazione di taglio</b>  |                    |                   |           |           |           |           |           |
|  | σ <sub>1</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | 116,02    | 146,37    | 160,39    | 160,73    | 160,97    |
|  | σ <sub>3</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | -1,91     | -2,41     | -2,90     | -3,38     | -3,86     |
| tensioni equivalenti   | σ <sub>v/SS</sub>  | N/mm <sup>2</sup> | 117,93    | 148,77    | 163,29    | 164,11    | 164,83    |
| <b>ipotesi deformazioni - energia</b>  |                    |                   |           |           |           |           |           |
|  | σ <sub>1</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | 116,02    | 146,37    | 160,39    | 160,73    | 160,97    |
|  | σ <sub>2</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | 57,06     | 71,98     | 78,75     | 78,67     | 77,60     |
|  | σ <sub>3</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | -1,91     | -2,41     | -2,90     | -3,38     | -3,86     |
| tensioni equivalenti   | σ <sub>v/GE</sub>  | N/mm <sup>2</sup> | 102,13    | 128,84    | 141,42    | 142,12    | 142,74    |
| <b>tensione equivalente massimale scelta</b>   | σ <sub>v</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | 117,93    | 148,77    | 163,29    | 164,11    | 164,83    |
| <b>verifica tensionale</b>   |                    |                   |           |           |           |           |           |
| f * z / σ <sub>v</sub> ≥ 1   |                    | -                 | 1,50      | 1,19      | 1,08      | 1,08      | 1,07      |
| <b>Spessore esito di calcolo</b>   |                    |                   |           |           |           |           |           |
| spessore effettivo   | e=                 | mm                | 39,53     | 49,72     | 60,06     | 70,60     | 81,20     |
|  |                    | mm                | 59,00     | 59,00     | 65,00     | 76,00     | 87,00     |
| addizionale per contrastare la corrosione  | c <sub>0</sub> =   | mm                | 0,50      | 0,50      | 0,50      | 0,50      | 0,50      |
| addizionale per considerare tolleranze di produzione   | c <sub>1</sub> =   | mm                | 1,18      | 1,18      | 1,30      | 1,52      | 1,74      |
| Riduzione dello spessore a seguito della produzione  | c <sub>2</sub> =   | mm                | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00      |
| arrotondamento allo spessore ordinato  | ε <sub>e</sub> =   | mm                | 17,79     | 7,60      | 3,14      | 3,38      | 3,56      |
| <b>spessore minimo</b>   | e <sub>min</sub> = | mm                | 40,03     | 50,22     | 60,56     | 71,10     | 81,70     |
| <b>spessore disponibile considerando la resistenza</b>   | e <sub>a</sub> =   | mm                | 57,32     | 57,32     | 63,20     | 73,98     | 84,76     |



## Appendice 2

| <b>Determinazione del Colpo di ariete (con misure di mitigazione)</b> |  |  |            |
|---|--|--|------------|
| salto lordo [m]   |  |  | 598,5      |
| perdite distribuite [m]   |  |  | 16,21      |
| salto netto [m]   |  |  | 582,29     |
| lunghezza condotta forzata [m]  |  |  | 4550       |
| diametro interno [mm]   |  |  | 3500       |
| velocità di propagazione [m/s]  |  |  | 1225       |
| tempo di chiusura [s]   |  |  | 60         |
| portata al tempo di chiusura [l/s]                                    |  |  | 42770      |
| numero di condotte [-]  |  |  | 1          |
| portata a seguito della chiusura [l/s]                                |  |  | 0          |
| variazione di portata [l/s]   |  |  | 42770      |
| velocità al tempo zero [m/s]  |  |  | 4,45       |
| variazione della velocità [m/s]                                       |  |  | 4,45       |
| tempo di riflessione [s]  |  |  | 7,43       |
| tempo di amplitudo [s]  |  |  | 14,86      |
| <b>varie formule classiche in funzione di t s</b>                     |  |  |            |
| <b>Joukovsky</b>  |  |  |            |
|   |  |  | non valido |
| sovrapressione dinamica   | $\Delta h$ [mWs]   |  | 555        |
|   | $\Delta p$ [bar]   |  | 56,6       |
|   | $\Delta p$ [N/mm <sup>2</sup> ]                                      |  | 5,66       |
| <b>Michaud/Allievi</b>  |  |  |            |
| per   | tempo di riflessione < tempo di chiusura < 10 x tempo di riflessione |  | ok         |
| sovrapressione dinamica   | $\Delta h$ [mWs]   |  | 69         |
|   | $\Delta p$ [bar]   |  | 7,0        |
|   | $\Delta p$ [N/mm <sup>2</sup> ]                                      |  | 0,70       |
| <b>Budau</b>  |  |  |            |
| per   |  |  | ok         |
| sovrapressione dinamica   | $\Delta h$ [mWs]   |  | 52         |
|   | $\Delta p$ [bar]   |  | 5,3        |
|   | $\Delta p$ [N/mm <sup>2</sup> ]                                      |  | 0,53       |
| <b>Colonna d'acqua rigida</b>   |  |  |            |
| per   | tempo di chiusura >> tempo di riflessione                            |  | non valido |
| sovrapressione dinamica   | $\Delta h$ [mWs]   |  | 34         |
|   | $\Delta p$ [bar]   |  | 3,5        |
|   | $\Delta p$ [N/mm <sup>2</sup> ]                                      |  | 0,35       |

| Dimensionamento considerando la pressione interna secondo DIN 2413  |                      |         |               |               |               |               |               |               |
|---|----------------------|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| classe di pressione   |                      |         | PN20          | PN30          | PN40          | PN50          | PN60          | PN70          |
| <b>sezione</b>  |                      | m.s.l.m | 1.065 - 975   | 975 - 868     | 868 - 761     | 761 - 654     | 654 - 547     | 547 - 440     |
| <b>caratteristiche dei materiali</b>  |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| materiale   |                      |         | Stahl / steel | Stahl / steel | Stahl / steel | Stahl / steel | Stahl / steel | Stahl / steel |
| classe di acciaio   |                      |         | S355          | S355          | S355          | S355          | S355          | S355          |
| tensione di snervamento   |                      | N/mm²   | 355           | 355           | 355           | 355           | 355           | 355           |
| diametro esterno  | d <sub>a</sub>       | mm      | 3540          | 3562          | 3584          | 3606          | 3628          | 3650          |
| qualità della saldatura   |                      | -       | 0,85          | 0,85          | 0,85          | 0,85          | 0,85          | 0,85          |
| fattore di sicurezza  | S                    | -       | 1,6           | 1,6           | 1,6           | 1,6           | 1,6           | 1,6           |
| tensione ammissibile  | σ <sub>zul</sub>     | N/mm²   | 221,88        | 221,88        | 221,88        | 221,88        | 221,88        | 221,88        |
| modulo elastico   | E                    | N/mm²   | 210000        | 210000        | 210000        | 210000        | 210000        | 210000        |
| modulo di Poisson   | μ                    | -       | 0,3           | 0,3           | 0,3           | 0,3           | 0,3           | 0,3           |
| <b>carichi</b>  |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| colpo d'ariete  | ΔP                   | N/mm²   | 0,70          | 0,70          | 0,70          | 0,70          | 0,70          | 0,70          |
| pressione di prova (STP) in bar   | STP                  | bar     | <b>18,10</b>  | <b>28,34</b>  | <b>38,57</b>  | <b>48,80</b>  | <b>59,03</b>  | <b>69,26</b>  |
| pressione di prova (STP)  | STP                  | N/mm²   | 1,81          | 2,83          | 3,86          | 4,88          | 5,90          | 6,93          |
| limite superiore dell'amplitude   | P <sub>i,So</sub>    | N/mm²   | 1,71          | 2,73          | 3,76          | 4,78          | 5,80          | 6,83          |
| limite inferiore dell'amplitude   | P <sub>i,Su</sub>    | N/mm²   | 0,31          | 1,33          | 2,36          | 3,38          | 4,40          | 5,43          |
| <b>spessore esito dal calcolo per sollecitazioni statiche e termiche fino a 120°C</b>   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| spessore del tubo   | s <sub>v</sub>       | mm      | 16,99         | 26,76         | 36,65         | 46,65         | 56,78         | 67,03         |
| <b>per sollecitazioni dinamiche (a.e. colpo d'ariete)</b>   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| numero dei cicli di carico  | n                    | -       | 3000          | 3000          | 3000          | 3000          | 3000          | 3000          |
| resistenza alla trazione  | σ <sub>b</sub>       | N/mm²   | 490           | 490           | 490           | 490           | 490           | 490           |
| resistenza a fatica   | σ <sub>Sch,t</sub>   | N/mm²   | 490           | 490           | 490           | 490           | 490           | 490           |
| fattore di sicurezza  | S <sub>D</sub>       | -       | 2,5           | 2,5           | 2,5           | 2,5           | 2,5           | 2,5           |
| sollecitazione di fatica  | σ <sub>zul,z</sub>   | N/mm²   | 196,00        | 196,00        | 196,00        | 196,00        | 196,00        | 196,00        |
| spessore  | s <sub>v</sub>       | mm      | 12,70         | 12,78         | 12,86         | 12,94         | 13,01         | 13,09         |
| aggiuntiva per considerare tolleranze di produzione   | c <sub>1'</sub>      | %       | 2             | 2             | 2             | 2             | 2             | 2             |
| aggiuntiva per contrastare la corrosione  | c <sub>2'</sub>      | mm      | 1,5           | 1,5           | 1,5           | 1,5           | 1,5           | 1,5           |
| $s = s_v + c_1' + c_2' = (s_v + c_2') \cdot \frac{100}{100 - c_1'} \text{ [mm]}$  |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| <b>spessore necessario</b>  | mm                   |         | <b>18,87</b>  | <b>28,84</b>  | <b>38,92</b>  | <b>49,14</b>  | <b>59,47</b>  | <b>69,92</b>  |
| <b>spessore effettivo</b>   | mm                   |         | <b>20,00</b>  | <b>31,00</b>  | <b>42,00</b>  | <b>53,00</b>  | <b>64,00</b>  | <b>75,00</b>  |
| <b>deformazione radiale sotto carichi esterni</b><br>(secondo l'AD-Merkblatt B6)  |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| <b>Determinazione della sovrappressione esterna ammissibile</b>   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| <b>condizioni di carico deformazione radiale elastica</b>   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| fattore di sicurezza  | S <sub>K</sub>       | -       | 3             | 3             | 3             | 3             | 3             | 3             |
| pressione critica ammissibile   | p <sub>krit,el</sub> | N/mm²   | 0,017         | 0,065         | 0,164         | 0,333         | 0,590         | 0,953         |
| <b>condizioni di carico deformazione radiale plastica</b>   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| fattore di sicurezza  | S                    | -       | 2,6           | 2,6           | 2,6           | 2,6           | 2,6           | 2,6           |
| pressione critica ammissibile   | p <sub>krit,pl</sub> | N/mm²   | 1,31          | 2,05          | 2,79          | 3,53          | 4,27          | 5,01          |
| $p_{krit,el} = \frac{2 \cdot E_R \cdot s_v^2}{S_K \cdot (1 - \mu^2) \cdot d_a^3} \text{ [N/mm}^2\text{]}$   |                      |         |               |               |               |               |               |               |
| $p_{krit,pl} = \frac{2 \cdot K}{S} \cdot \frac{s_v}{d_a} \cdot \left( 1 + \frac{1,5 \cdot d_a \cdot (1 - 0,2 \cdot d_a / l) \cdot d_a}{100 \cdot s_v} \right)^{-1} \text{ [N/mm}^2\text{]}$ |                      |         |               |               |               |               |               |               |



| Dimensionamento di condotte in acciaio soggette a pressione interna e forze assiali<br>secondo la norma DIN EN 13480-3 |                    |                   |             |           |           |           |           |           |
|--|--------------------|-------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| classe di pressione  |                    |                   | PN20        | PN30      | PN40      | PN50      | PN60      | PN70      |
| <b>sezione</b>   |                    | ms.l.m            | 1.065 - 975 | 975 - 868 | 868 - 761 | 761 - 654 | 654 - 547 | 547 - 440 |
| <b>caratteristiche dei materiali</b>   |                    |                   |             |           |           |           |           |           |
| resistenza a trazione minima a temperatura ambiente  | R <sub>m</sub>     | N/mm <sup>2</sup> | 500,00      | 500,00    | 500,00    | 500,00    | 500,00    | 500,00    |
| tensione di snervamento  | R <sub>p0,2t</sub> | N/mm <sup>2</sup> | 355,00      | 355,00    | 355,00    | 355,00    | 355,00    | 355,00    |
| qualità della saldatura  | z                  | -                 | 0,85        | 0,85      | 0,85      | 0,85      | 0,85      | 0,85      |
| <b>geometria della condotta</b>  |                    |                   |             |           |           |           |           |           |
| diametro esterno   | D <sub>0</sub>     | mm                | 3540,00     | 3562,00   | 3584,00   | 3606,00   | 3628,00   | 3650,00   |
| diametro interno   | d <sub>i</sub>     | mm                | 3500,00     | 3500,00   | 3500,00   | 3500,00   | 3500,00   | 3500,00   |
| <b>tensioni ammissibili</b>  |                    |                   |             |           |           |           |           |           |
| fattore di sicurezza   | S1                 | -                 | 1,50        | 1,50      | 1,50      | 1,50      | 1,50      | 1,50      |
|  |                    |                   | 236,7       | 236,7     | 236,7     | 236,7     | 236,7     | 236,7     |
|  | S2                 | -                 | 2,40        | 2,40      | 2,40      | 2,40      | 2,40      | 2,40      |
|  |                    |                   | 208,3       | 208,3     | 208,3     | 208,3     | 208,3     | 208,3     |
| tensioni ammissibili   | f                  | N/mm <sup>2</sup> | 208,33      | 208,33    | 208,33    | 208,33    | 208,33    | 208,33    |
| <b>ipotesi di carico</b>   |                    |                   |             |           |           |           |           |           |
| pressione di prova (STP)   | p <sub>i</sub>     | N/mm <sup>2</sup> | 1,81        | 2,83      | 3,86      | 4,88      | 5,90      | 6,93      |
| <b>equazioni elementari</b>  |                    |                   |             |           |           |           |           |           |
| diametro considerato d (d <sub>i</sub> ≤ d ≤ D <sub>0</sub> )  | d                  | mm                | 3520,00     | 3531,00   | 3542,00   | 3553,00   | 3564,00   | 3575,00   |
| tensione radiale   | σ <sub>r</sub>     | N/mm <sup>2</sup> | -0,90       | -1,40     | -1,89     | -2,39     | -2,87     | -3,35     |
| tensione tangenziale   | σ <sub>t</sub>     | N/mm <sup>2</sup> | 158,41      | 159,95    | 160,69    | 161,11    | 161,39    | 161,58    |
| tensione assiale   | σ <sub>a</sub>     | N/mm <sup>2</sup> | 78,76       | 79,28     | 79,40     | 79,36     | 79,26     | 79,11     |
| <b>tensioni equivalenti</b>  |                    |                   |             |           |           |           |           |           |
| <b>ipotesi della sollecitazione di taglio</b>  |                    |                   |             |           |           |           |           |           |
|  | σ <sub>1</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | 158,41      | 159,95    | 160,69    | 161,11    | 161,39    | 161,58    |
|  | σ <sub>3</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | -0,90       | -1,40     | -1,89     | -2,39     | -2,87     | -3,35     |
| tensioni equivalenti   | σ <sub>v/SS</sub>  | N/mm <sup>2</sup> | 159,31      | 161,35    | 162,58    | 163,50    | 164,26    | 164,93    |
| <b>ipotesi deformazioni - energia</b>  |                    |                   |             |           |           |           |           |           |
|  | σ <sub>1</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | 158,41      | 159,95    | 160,69    | 161,11    | 161,39    | 161,58    |
|  | σ <sub>2</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | 78,76       | 79,28     | 79,40     | 79,36     | 79,26     | 79,11     |
|  | σ <sub>3</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | -0,90       | -1,40     | -1,89     | -2,39     | -2,87     | -3,35     |
| tensioni equivalenti   | σ <sub>v/GE</sub>  | N/mm <sup>2</sup> | 137,96      | 139,74    | 140,80    | 141,59    | 142,25    | 142,84    |
| tensione equivalente massimale scelta  | σ <sub>v</sub> =   | N/mm <sup>2</sup> | 159,31      | 161,35    | 162,58    | 163,50    | 164,26    | 164,93    |
| <b>verifica tensionale</b>   |                    |                   |             |           |           |           |           |           |
| f * z / σ <sub>v</sub> ≥ 1   |                    | -                 | 1,11        | 1,10      | 1,09      | 1,08      | 1,08      | 1,07      |
| <b>Spessore esito di calcolo</b>   |                    |                   |             |           |           |           |           |           |
| spessore effettivo   | e=                 | mm                | 18,00       | 28,27     | 38,61     | 49,01     | 59,48     | 70,01     |
| aggiuntiva per contrastare la corrosione   | c <sub>0</sub> =   | mm                | 0,50        | 0,50      | 0,50      | 0,50      | 0,50      | 0,50      |
| aggiuntiva per considerare tolleranze di produzione  | c <sub>1</sub> =   | mm                | 0,40        | 0,62      | 0,84      | 1,06      | 1,28      | 1,50      |
| Riduzione dello spessore a seguito della produzione  | c <sub>2</sub> =   | mm                | 0,00        | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00      |
| arrotondamento allo spessore ordinato  | ε <sub>e</sub> =   | mm                | 1,10        | 1,61      | 2,05      | 2,43      | 2,74      | 2,99      |
| <b>spessore minimo</b>   | e <sub>min</sub> = | mm                | 18,50       | 28,77     | 39,11     | 49,51     | 59,98     | 70,51     |
| <b>spessore disponibile considerando la resistenza</b>   | e <sub>a</sub> =   | mm                | 19,10       | 29,88     | 40,66     | 51,44     | 62,22     | 73,00     |

