

REGIONE CAMPANIA

Acqua Campania S.p.A.

UTILIZZO IDROPOTABILE DELLE ACQUE
DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO E
POTENZIAMENTO DELL'ALIMENTAZIONE
POTABILE PER L'AREA BENEVENTANA

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

Stralcio Allegato IV D.L. 31.05.2021 n.77 - L. di conversione 21.07.2021 n.108

Responsabile Unico del Procedimento
Dirigente Ciclo Integrato delle Acque della G.R. della Campania
Ing. Rosario Manzi

Il Concessionario
Acqua Campania S.p.A.
Direttore Generale
Area Tecnica
(Ing. Gianluca Maria SALVIA)


I Progettisti



Coordinatore responsabile della
Integrazione delle Prestazioni
Specialistiche

Revisione	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
0	Dicembre 2021	EMISSIONE PER VIA	---	---	---
TITOLO : RELAZIONE TECNICA - IDRAULICA - MODELLAZIONE FENOMENI DI MOTO VARIO			Progettazione:  VIANINI LAVORI S.p.A. 		
Allegato	ED.02.6.02		Revisione:	0	Scala: -



Università degli Studi di Napoli Federico II

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Attività a supporto della progettazione del pozzo piezometrico a servizio dell'impianto idroelettrico nell'ambito del progetto definitivo di "Utilizzo idropotabile delle acque dell'invaso di Campolattaro e potenziamento dell'alimentazione potabile per l'area beneventana"

Napoli, Marzo 2021

Il Direttore del Dipartimento

Prof. Ing. Francesco Pirozzi

Il Responsabile scientifico

Prof. Ing. Maurizio Giugni

1. PREMESSE

Nel gennaio 2021, a seguito di accordi intercorsi in precedenza, è stata stipulata una convenzione di ricerca tra il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA) dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e Acqua Campania S.p.A., sul tema "Attività a supporto della progettazione del pozzo piezometrico a servizio dell'impianto idroelettrico nell'ambito del progetto definitivo di «Utilizzo idropotabile delle acque dell'invaso di Campolattaro e potenziamento dell'alimentazione potabile per l'area beneventana»" (Responsabile Scientifico prof. ing. Maurizio Giugni).

Nel seguito, dopo un sintetico riepilogo delle caratteristiche principali dell'impianto idroelettrico da realizzarsi nell'ambito del progetto definitivo di «Utilizzo idropotabile delle acque dell'invaso di Campolattaro e potenziamento dell'alimentazione potabile per l'area beneventana», vengono illustrate dapprima le caratteristiche principali del modello matematico elaborato per l'analisi del complesso sistema galleria forzata - pozzo piezometrico - condotta forzata - centrale idroelettrica e successivamente presentati i risultati ottenuti nell'ambito delle attività svolte.

2. IMPIANTO IDROELETTRICO A SERVIZIO DELL'INVASO DI CAMPOLATTARO: CARATTERISTICHE PRINCIPALI

Il sistema idrico di Campolattaro prevede l'utilizzazione delle acque del fiume Tammaro e del torrente Tammarecchia mediante l'accumulo e la regolazione dei deflussi in un serbatoio artificiale realizzato lungo il fiume Tammaro, a monte dell'abitato di Campolattaro (BN).

La diga di sbarramento - realizzata in terra con nucleo centrale di materiali alluvionali fini e rinfianchi a monte e valle di materiali grossolani alluvionali o di frantumazione - è stata realizzata in località Campolattaro, all'incirca 800 m a monte del P.te Ligustino. L'invaso complessivo, con livello di ritenuta normale a 377.25 m s.l.m., è di 125 Mm³; quello al livello di massimo invaso, posto a quota 381.45 m s.l.m., è di 156 Mm³. La capacità utile per la regolazione è stata fissata in 109 Mm³, assumendo una riduzione del volume di 16 Mm³ per i fenomeni di interrimento.

Le caratteristiche tecniche dell'invaso e dello sbarramento sono nel seguito riepilogate:

- Sviluppo del coronamento: 820.00 m
- Larghezza del coronamento: 9.00 m
- Piano di coronamento: 387.40 m s.l.m.
- Altezza massima del rilevato: 63.00 m
- Livello di massimo invaso: 381.45 m s.l.m.
- Volume invasato alla massima quota: circa 156 Mm³
- Livello di ritenuta normale: 377.25 m s.l.m.
- Volume invasato alla quota di ritenuta normale: circa 125 Mm³
- Livello di massimo svaso: 351.00 m s.l.m.

- Volume relativo al massimo svaso: 16 Mm³.

L'invaso di Campolattaro, in virtù della sua localizzazione e della sua capacità, rappresenta una risorsa strategica di significativa importanza per la Regione Campania, con possibilità di utilizzazione idropotabile, irrigua ed energetica.

Con specifico riferimento alla produzione energetica, è stata prevista la realizzazione di un impianto idroelettrico, realizzato secondo lo schema classico riportato in Figura 1 e costituito dalle opere seguenti:

- Galleria forzata
- Pozzo piezometrico
- Condotta forzata
- Centrale idroelettrica

di cui sono state sinteticamente riportate nel seguito le caratteristiche.

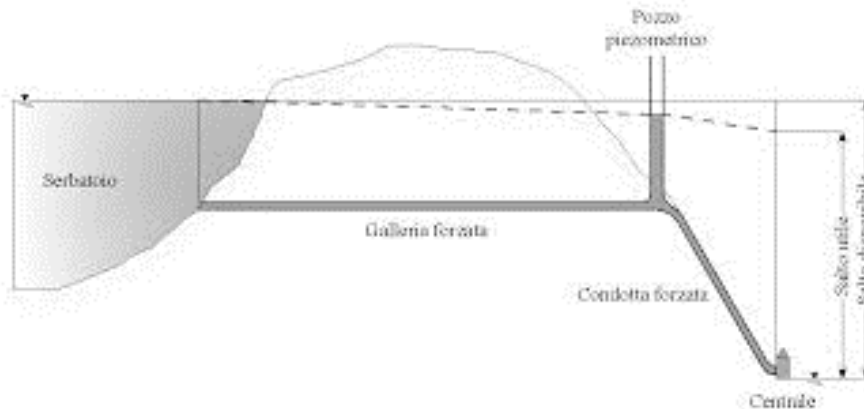


Fig. 1. Schema di un impianto idroelettrico

2.1 GALLERIA FORZATA

La galleria di adduzione sarà realizzata mediante una condotta in acciaio delle seguenti caratteristiche:

- Primo tratto:
 - $D = 1800 \text{ mm}$
 - $L = 14.04 \text{ m}$
 - $s = 12.7 \text{ mm}$
 - $Q = 7.60 \text{ m}^3/\text{s}$ (portata massima complessiva, corrispondente all'erogazione della massima portata irrigua e di quella relativa al consumo idropotabile)
 - $V_0 = 2.40 \text{ m/s}$
- Secondo tratto:
 - $D = 2200 \text{ mm}$
 - $L = 7304.08 \text{ m}$
 - $s = 12.7 \text{ mm}$

- $Q = 7.60 \text{ m}^3/\text{s}$
- $V_0 = 1.98 \text{ m/s}$

Le perdite di carico, calcolate con la classica formula di Colebrook e White, assumendo una scabrezza equivalente pari a 0.05 mm a tubi nuovi e a 1.0 mm a tubi usati, risultano rispettivamente all'incirca pari a 6.79 m a tubi nuovi (corrispondenti a un valore pari a circa 98 del coefficiente di conducibilità idraulica K' della formula di Gauckler e Strickler) e a 10.94 m a tubi usati (corrispondenti a un valore di K' pari a circa 77).

2.2 POZZO PIEZOMETRICO

Il pozzo piezometrico negli impianti idroelettrici ha la funzione di proteggere il tratto di tubazione a monte del manufatto (cioè la galleria forzata) dai fenomeni di moto vario ingenerati dalle variazioni di portata in centrale conseguenti a variazioni della potenza erogata. Al variare della portata, il pozzo dà luogo ad oscillazioni della portata in arrivo e del livello idrico nel pozzo medesimo intorno alla condizione del nuovo regime, che vanno progressivamente smorzandosi a causa delle resistenze al moto. Il transitorio, di tipo anelastico se il pozzo è di sufficienti dimensioni, è governato dall'energia cinetica accumulata in condotta e dall'energia potenziale della colonna liquida contenuta nel pozzo, con una continua trasformazione dell'energia potenziale in cinetica e viceversa, smorzata, come già detto, dalle resistenze al moto.

In Figura 2 è riportato uno schema del pozzo piezometrico, a sezione circolare del diametro interno D_p pari a 2.20 m, con altezza H_p pari a 72.09 m. La quota della base del pozzo piezometrico - di rilevante importanza ai fini delle simulazioni di moto vario proposte nel seguito - è pari a 343.48 m s.l.m., per cui la sommità del pozzo risulta situata alla quota di 415.57 m s.l.m..

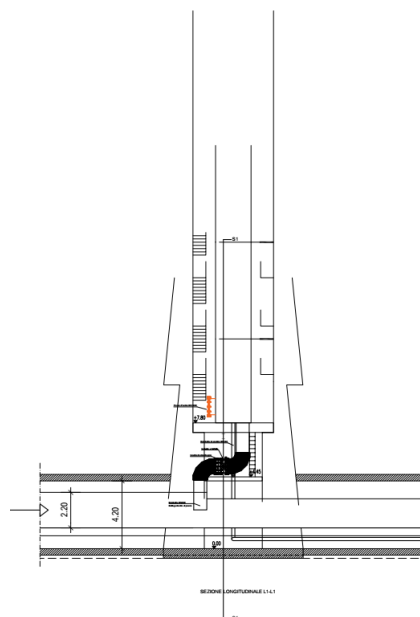


Fig. 2. Schema del pozzo piezometrico

Il pozzo piezometrico è collegato alla galleria forzata mediante un tronchetto del diametro di 800 mm e della lunghezza di 8.35 m (Fig. 2), e munito alla base di una strozzatura simmetrica di diametro D_s pari a 600 mm.

2.3 CONDOTTA FORZATA

La condotta forzata sarà realizzata mediante una condotta in acciaio delle seguenti caratteristiche:

- $D = 1800$ mm
- $L = 546.83$ m
- $s = 16.0$ mm
- $Q = 7.60$ m³/s
- $V_0 = 3.00$ m/s

Le perdite di carico, calcolate con la classica formula di Colebrook e White, assumendo una scabrezza ε pari a 0.05 mm a tubi nuovi e a 1 mm a tubi usati, risultano pari rispettivamente all'incirca a 1.43 m a tubi nuovi e a 2.39 m a tubi usati.

La quota in corrispondenza della generatrice superiore della condotta forzata nella sezione d'imbocco - di significativa importanza ai fini delle simulazioni di moto vario proposte nel seguito - è pari a 338.77 m s.l.m.

2.4 CENTRALE IDROELETTRICA

La soluzione tecnica scelta per la realizzazione della centrale idroelettrica, ubicata a quota 278.61 m s.l.m., prevede due gruppi turbina-alternatore delle seguenti caratteristiche:

- 1 gruppo Francis, con portata massima di 6.10 m³/s;
- 1 gruppo Pelton con 5 getti, con portata di 300 l/s per getto, corrispondente ad una portata massima pari a 1.5 m³/s.

La portata complessivamente turbinabile è quindi pari a 7.60 m³/s.

3. MODELLO MATEMATICO DI SIMULAZIONE

Il modello di simulazione è stato elaborato con riferimento allo schema galleria - pozzo piezometrico - condotta forzata riportato in Figura 1, analizzando la risposta del sistema idraulico in condizioni di moto vario elastico.

In maggior dettaglio, la variazione di quota piezometrica h (nel tempo t e nello spazio s) in una condotta in pressione può essere determinata dalla soluzione del seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial s} = -\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - j \\ \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial s} \end{cases} \quad (1)$$

in cui V rappresenta la velocità, g l'accelerazione di gravità e j il termine delle resistenze al moto. Il termine c rappresenta la celerità di propagazione della perturbazione, data da:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{\epsilon D}{Es}}} \quad (2)$$

essendo ϵ il modulo di comprimibilità cubica dell'acqua, ρ la densità dell'acqua, mentre D , s ed E indicano, rispettivamente, il diametro, lo spessore e il modulo elastico della condotta.

L'integrazione di tali equazioni, nel caso in cui si tenga conto delle resistenze al moto, non può avvenire in forma chiusa, ma è necessario ricorrere a procedure numeriche. In particolare, nelle pratiche applicazioni l'integrazione può essere effettuata mediante il metodo delle caratteristiche, con riferimento al seguente sistema di equazioni (Fig. 3):

$$\begin{aligned} h(s_k, t_0 + \Delta t) - h(s_{k-1}, t_0) &= -\frac{c}{g} [V(s_k, t_0 + \Delta t) - V(s_{k-1}, t_0)] - \frac{f V(s_{k-1}, t_0) |V(s_{k-1}, t_0)|}{D 2g} \Delta s \\ h(s_k, t_0 + \Delta t) - h(s_{k+1}, t_0) &= -\frac{c}{g} [V(s_k, t_0 + \Delta t) - V(s_{k+1}, t_0)] + \frac{f V(s_{k+1}, t_0) |V(s_{k+1}, t_0)|}{D 2g} \Delta s \end{aligned} \quad (3)$$

avendo indicato con f l'indice di resistenza della formula di Darcy-Weisbach. La prima delle equazioni (3) rappresenta l'integrazione delle equazioni lungo la caratteristica positiva (C^+), la seconda lungo la caratteristica negativa (C^-) (Fig. 3).

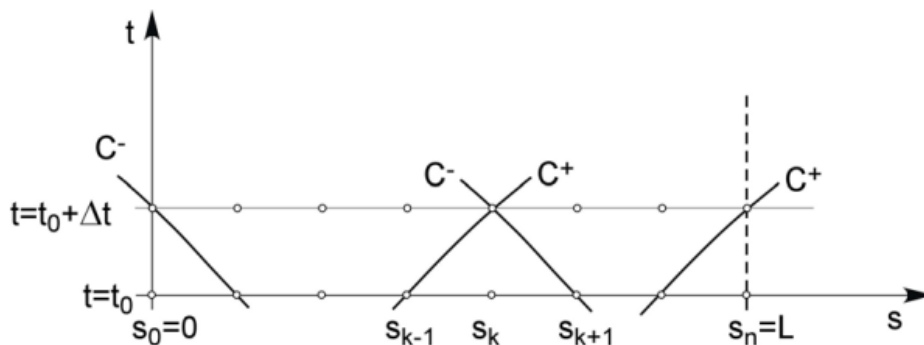


Fig. 3. Illustrazione schematica del procedimento di integrazione nel tempo delle equazioni

Alle equazioni (1), ovvero alla loro integrazione lungo le linee caratteristiche, si accompagnano le condizioni iniziali (tipicamente riferite alle condizioni di moto uniforme) e quelle al contorno. Per queste ultime, in particolare, in base all'andamento delle linee caratteristiche è necessario fissare una condizione a monte ed una a valle. In generale, si assume all'imbocco (nella sezione iniziale) un valore costante della pressione (corrispondente alle condizioni di serbatoio a livello invariabile), mentre all'otturatore (nella sezione a valle) si considera assegnata la legge con cui varia nel tempo la portata e, quindi, la velocità.

I calcoli sono stati effettuati, come già precisato, con riferimento allo schema riportato in Figura 1 e alle caratteristiche dimensionali ed idrauliche del sistema elencate in precedenza. In particolare, la condizione all'imbocco è rappresentata dal livello idrico all'interno del serbatoio artificiale, per il quale si è ammessa una condizione di massimo invaso con quota di pelo libero pari a 377.25 m s.l.m. e una condizione di minimo

invaso con quota di pelo libero di 360.00 m s.l.m.. La galleria è costituita da una condotta in acciaio, di lunghezza complessiva pari a 7318.12 m e pendenza 0.00109. Essa presenta un primo tratto, di lunghezza pari a 14.04 m, con diametro nominale DN 1800 mm e un successivo tratto, di lunghezza pari a 7304.08 m, con DN 2200 mm, ambedue caratterizzati da uno spessore di 12.7 mm. Alla estremità della galleria è ubicato il pozzo piezometrico, che presenta una sezione circolare di diametro interno pari a 2.20 m, con quota di base 343.48 m s.l.m. e altezza 72.09 m. Il pozzo è collegato alla galleria mediante un tronchetto avente diametro 800 mm, di lunghezza 8.35 m, alla cui estremità, alla base del pozzo, è prevista una strozzatura simmetrica avente diametro $D_s=600$ mm. La quota dell'asse della galleria è, in tale sezione, pari a 338.09 m s.l.m.. Infine, la condotta forzata, di diametro nominale 1800 mm, presenta lunghezza di 546.83 m e quota asse della sezione terminale pari a 278.61 m s.l.m., con uno spessore di 16 mm.

Il dettaglio delle caratteristiche della galleria e della condotta forzata è stato riportato, per comodità di lettura, in Tabella 1.

Tratto	L (m)	DN (mm)	DE (mm)	DI (mm)	s (mm)	c (m/s)
Galleria	14.04	1800	1832	1807	12.7	925
	7304.08	2200	2235	2210	12.7	899
Condotta forzata	546.83	1800	1829	1797	16.0	1017

Tab. 1. Caratteristiche dimensionali di galleria e condotta forzata

I valori della celerità, in particolare, sono stati calcolati tenendo conto delle condizioni di vincolo delle condotte, considerando un coefficiente di supporto all'incirca pari a 0.85 sia per la galleria che per la condotta forzata. Per il calcolo delle resistenze al moto si è fatto riferimento alla formula di Colebrook-White, assumendo una scabrezza equivalente pari a 0.05 mm per la condizione di tubi nuovi e a 1.0 mm per la condizione di tubi usati. Il dettaglio delle perdite di carico a regime, in condizioni di moto uniforme ed in corrispondenza della portata massima, pari a 7.60 m³/s, è riportato in Tabella 2.

Tratto	DN (mm)	DI (mm)	Q (m ³ /s)	V ₀ (m/s)	ΔH_n (m)	ΔH_u (m)
Galleria	1800	1807	7.60	3.00	0.04	0.06
	2200	2210	7.60	1.98	6.75	10.88
Condotta forzata	1800	1797	7.60	3.00	1.43	2.39

Tab. 2. Caratteristiche idrauliche di galleria e condotta forzata

4. MANOVRE PRESE IN ESAME

Nel seguito sono sintetizzati i risultati delle simulazioni effettuate per le diverse condizioni di funzionamento dell'impianto prese in esame, definite con riferimento al Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica "Utilizzo idropotabile delle acque dell'invaso di Campolattaro e potenziamento dell'alimentazione potabile per l'area beneventana":

- Manovre di chiusura parziale
- Manovre di chiusura totale
- Manovre di apertura

4.1 MANOVRE DI CHIUSURA PARZIALE

Si è fatto innanzitutto riferimento alla manovra di chiusura parziale, per la quale si è considerata una variazione lineare della portata nella durata di 12 s dal valore massimo (pari a 7.60 m³/s) a quello di funzionamento della sola turbina Pelton a cinque getti (pari a 1.50 m³/s). Per le manovre di chiusura si è fatto riferimento alla condizione di tubi nuovi, in modo da operare a vantaggio di sicurezza.

I calcoli sono stati effettuati considerando sia la condizione di massimo vaso (in modo da verificare la compatibilità del massimo sovrizzo idrico con l'altezza del pozzo), sia quella di minimo vaso (onde verificare che, in condizione di livello minimo nel pozzo, sia comunque garantito un adeguato franco di sicurezza rispetto alla base, in modo da impedire l'ingresso di aria nella condotta forzata).

Le simulazioni effettuate hanno consentito altresì il calcolo della pressione alla base del pozzo piezometrico e dell'involuppo delle pressioni minime e massime lungo la galleria e la condotta forzata, al fine di verificare gli spessori ad esse assegnati. All'uopo si è fatto riferimento alla Norma UNI 1285-68 (Calcolo di resistenza dei tubi metallici soggetti a pressione interna) e in particolare alla relazione:

$$s = \left(\frac{P \cdot DE}{200 \cdot \sigma_{amm} \cdot z + p} + c \right) \cdot \frac{100}{100 - a} \quad (4)$$

in cui:

- s : spessore (mm);
- P : pressione interna (kg/cm²);
- DE : diametro esterno (mm);
- c : sovrappessore, da definire in funzione del materiale, del procedimento di fabbricazione e delle condizioni di corrosione in esercizio, assunto nel caso specifico pari a 1 mm;
- z : coefficiente di efficienza della saldatura (0.5 per tubi saldati di acciaio Fe360; 0.8 per tubi saldati di acciaio di qualità; 1 per tubi privi di saldatura o saldati, di acciaio di qualità sottoposti a controlli non distruttivi sull'intero sviluppo della saldatura), per il quale è stato assunto un valore pari a 0.8;
- a : tolleranza di fabbricazione sullo spessore della tubazione, pari al 12.5%;

- σ_{amm} : sollecitazione massima unitaria ammissibile determinata a mezzo dei coefficienti di sicurezza e in funzione dei carichi di snervamento o di rottura, valutabile dalla relazione:

$$\sigma_{amm} = \min\left(\frac{R}{K}, \frac{R_s}{K_1}\right)$$

in cui:

- R = valore minimo del carico unitario di rottura relativo al tipo di acciaio adottato, in questo caso L355, per cui $R=52.0055 \text{ Kg/mm}^2$;
- R_s = valore minimo del carico unitario di snervamento relativo al tipo di acciaio adottato, in questo caso pari a 36.1999 Kg/mm^2 ;
- K = coefficiente di sicurezza non inferiore a 2.3, assunto pari a 2.3;
- K_1 = coefficiente di sicurezza non inferiore a 1.6, assunto pari a 1.6.

4.1.1 MASSIMO INVASO - MANOVRA DI CHIUSURA PARZIALE

Le simulazioni sono state condotte considerando una quota di pelo libero nel serbatoio pari a 377.25 m s.l.m..

Le Figure 4÷6 riportano rispettivamente, per la condizione di massimo invaso, l'andamento dei livelli idrici all'interno del pozzo riferiti alla base del pozzo medesimo, della pressione alla base del pozzo, dell'involuppo delle pressioni massime e minime lungo la galleria e la condotta forzata.

I valori significativi desunti dalle simulazioni sono di seguito riportati:

- massimo sovrizzo nel pozzo: 55.97 m
- minimo sovrizzo nel pozzo: 21.96 m
- massima pressione alla base del pozzo: 75.25 m
- minima pressione alla base del pozzo: 27.30 m
- massima pressione in galleria: 75.25 m
- minima pressione in galleria: 27.21 m
- massima pressione in condotta forzata: 141.55 m
- minima pressione in condotta forzata: 27.02 m

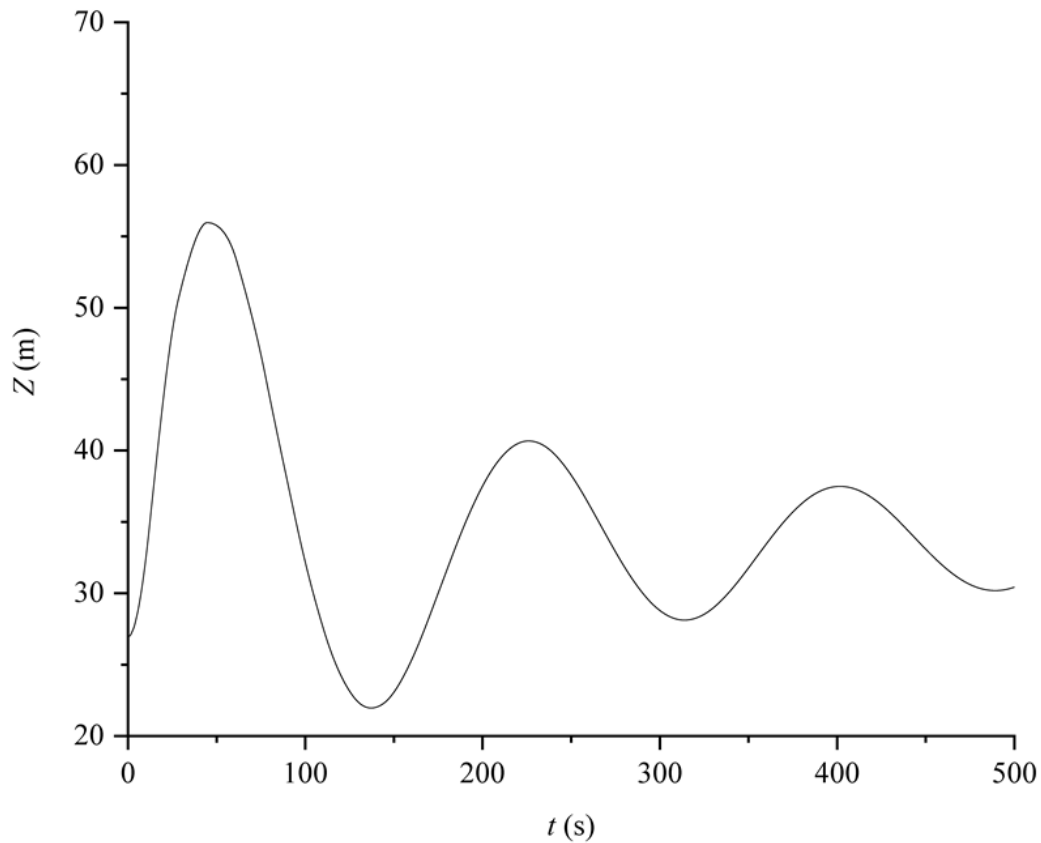


Fig. 4. Andamento dei livelli idrici nel pozzo piezometrico

Con specifico riferimento alla Figura 4, onde assicurarne la piena comprensione, si ricorda che la manovra in esame è riferita al livello di massimo invaso, pari a 377.25 m s.l.m.. A tale quota vanno sottratte le perdite di carico a tubi nuovi, pari a 6.77 m, al fine di individuare la quota del livello idrico nel pozzo nell'istante iniziale della manovra di chiusura, pari quindi a 370.48 m s.l.m.. In tale istante il dislivello idrico riferito alla base del pozzo (posta alla quota 343.48 m s.l.m.), è quindi pari a 27.00 m, come correttamente rappresentato in Figura 4.

Dalla suddetta Figura può evincersi che il livello idrico massimo all'interno del pozzo corrisponde ad una quota pari a 399.45 m s.l.m, ben lontana dalla sommità del pozzo, situata alla quota di 415.57 m s.l.m., con un franco pari a 16.12 m; risulta altresì molto elevato il franco rispetto all'imbocco della galleria forzata.

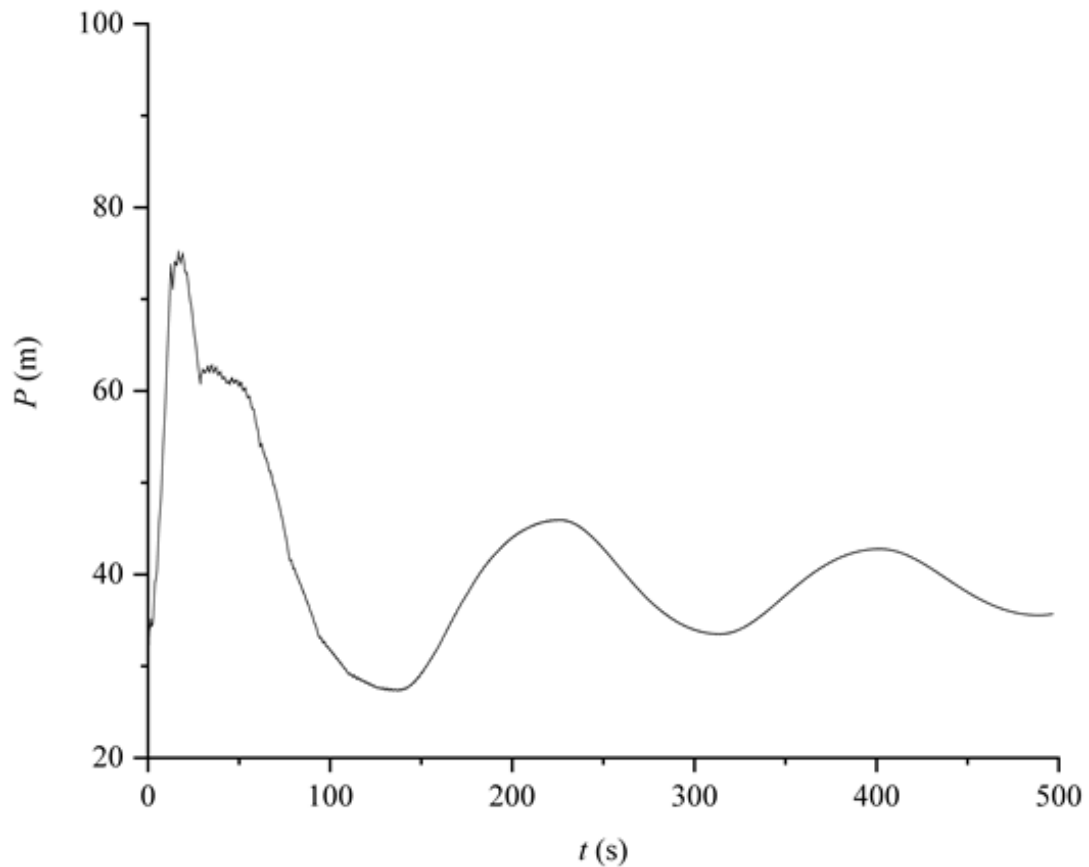


Fig. 5. Andamento della pressione alla base del pozzo piezometrico

Per quanto concerne la verifica dello spessore, in particolare per quanto concerne la condotta forzata, assoggettata nella sua sezione terminale ad una pressione di circa 14.2 bar (Fig. 6), essa risulta largamente soddisfatta. Infatti, dalla citata relazione (4), applicata con riferimento alla ben più gravosa pressione di collaudo (pari a 1.5 volte la pressione calcolata), risulta uno spessore di calcolo pari a 13.19 mm, a fronte dei 16 mm previsti. Analogamente per la galleria, assoggettata ad una pressione massima di 7.53 bar, lo spessore corrispondente alla pressione di collaudo è pari a 7.55 mm, a fronte di uno spessore di progetto di 12.7 mm.

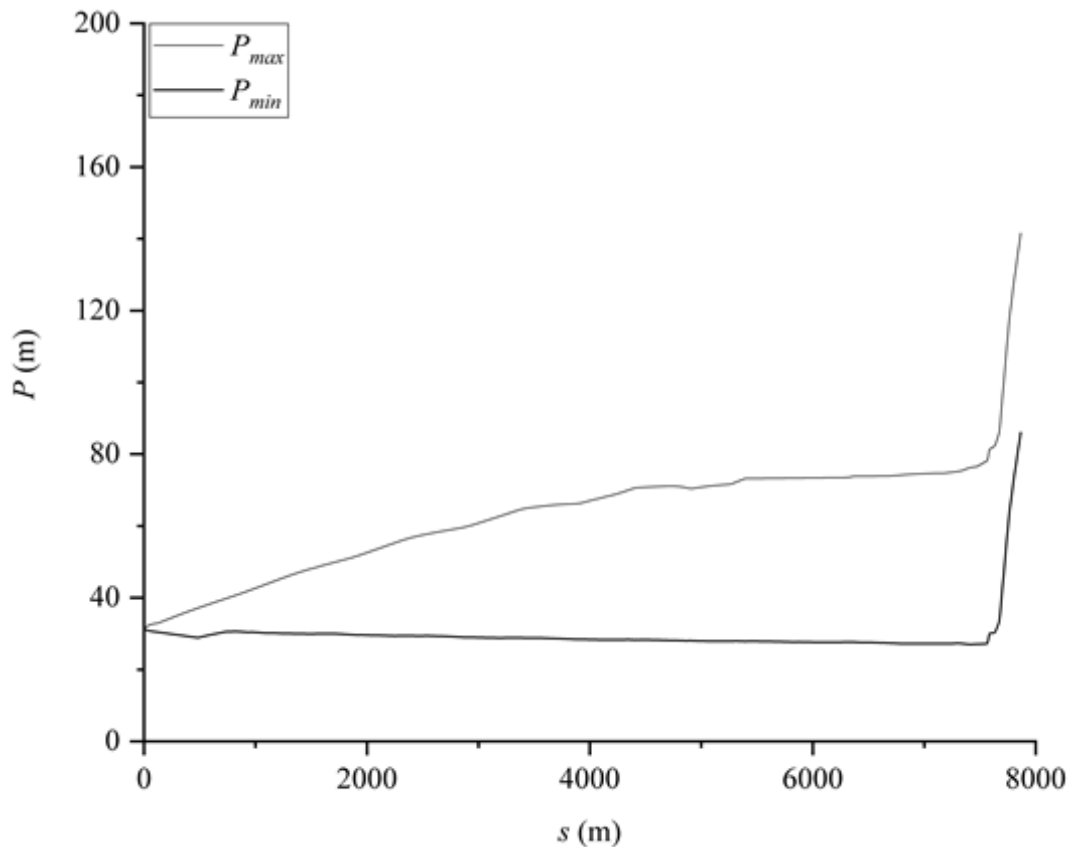


Fig. 6. Inviluppo delle pressioni massime e minime lungo la galleria e la condotta forzata

4.1.2 MINIMO INVASO - MANOVRA DI CHIUSURA PARZIALE

Le simulazioni sono state condotte considerando una quota di pelo libero nel serbatoio pari a 360.00 m s.l.m.. Le Figure 7÷9 riportano rispettivamente, per la condizione di minimo invasivo, l'andamento dei livelli idrici all'interno del pozzo, della pressione alla base del pozzo, dell'inviluppo delle pressioni massime e minime lungo la galleria e la condotta forzata.

I valori significativi desunti dalle simulazioni sono di seguito riportati:

- massimo sovrizzo nel pozzo: 38.72 m
- minimo sovrizzo nel pozzo: 4.71 m
- massima pressione alla base del pozzo: 58.03 m
- minima pressione alla base del pozzo: 10.08 m
- massima pressione in galleria: 58.03 m
- minima pressione in galleria: 9.98 m
- massima pressione in condotta forzata: 124.32 m
- minima pressione in condotta forzata: 9.79 m

La manovra di chiusura parziale con serbatoio al minimo invasivo è ovviamente particolarmente temibile per la possibilità che le oscillazioni del livello idrico diano luogo alla scopertura dell'imbocco della condotta forzata e all'immissione in essa di aria. Dalla Figura 7 può evincersi che il livello idrico minimo all'interno del

pozzo piezometrico corrisponde ad una quota pari a 348.19 m s.l.m, con un margine di sicurezza di 4.71 m rispetto alla base del pozzo e di 9.42 m rispetto alla generatrice superiore della condotta forzata nella sezione d'imbocco, situata alla quota di 338.77 m s.l.m..

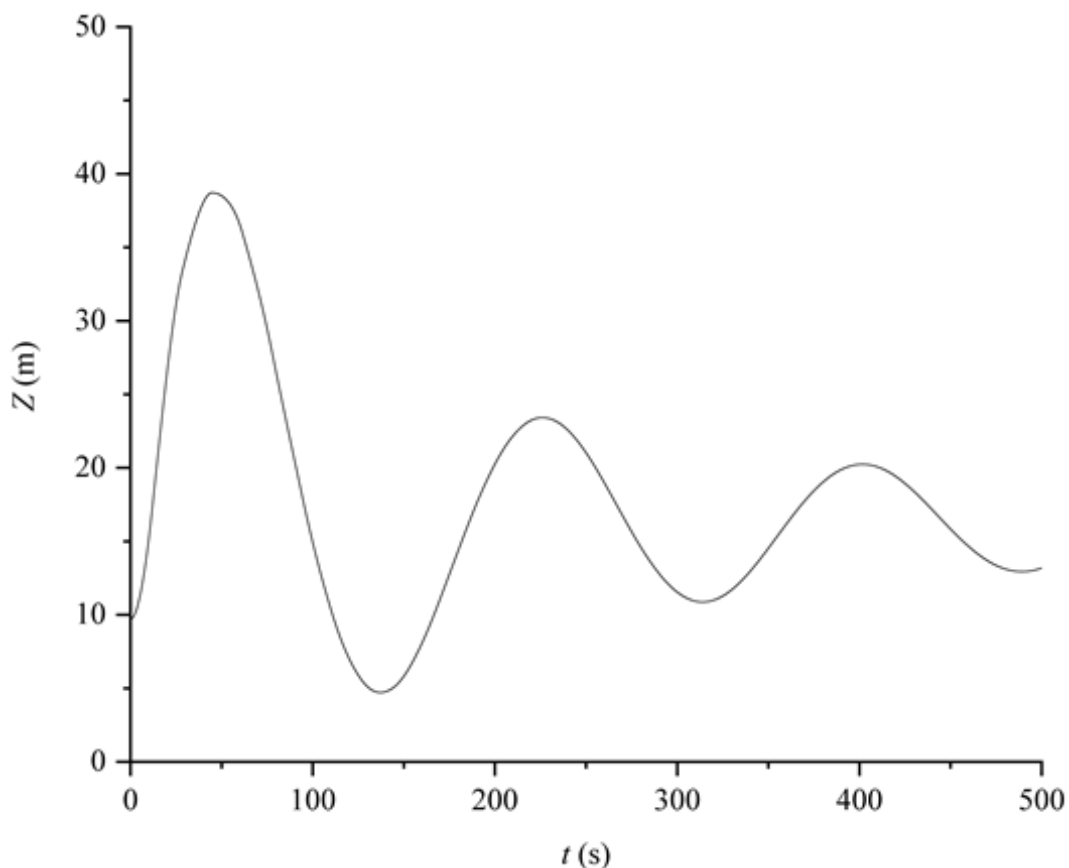


Fig. 7. Andamento dei livelli idrici nel pozzo piezometrico

Non vi sono ovviamente problemi di sorta per quanto concerne la verifica dello spessore della condotta forzata, assoggettata nella sua sezione terminale ad una pressione di circa 12.4 bar, e della galleria, soggetta a una pressione massima di 5.80 bar (Fig. 9).

Nel complesso, quindi, può ritenersi che il pozzo piezometrico, nell'assetto progettuale proposto, assicuri condizioni di funzionamento più che soddisfacenti: dalle simulazioni effettuate, infatti, con riferimento alle condizioni sia di massimo che di minimo invaso, sono stati desunti valori dal massimo e del minimo livello idrico del pozzo assolutamente compatibili. In maggior dettaglio, il franco risulta pari a 16.12 m per le condizioni di massimo invaso, e a 4.71 m rispetto alla base del pozzo e 9.42 m rispetto alla generatrice superiore della condotta forzata nella sezione d'imbocco per le condizioni di minimo invaso.

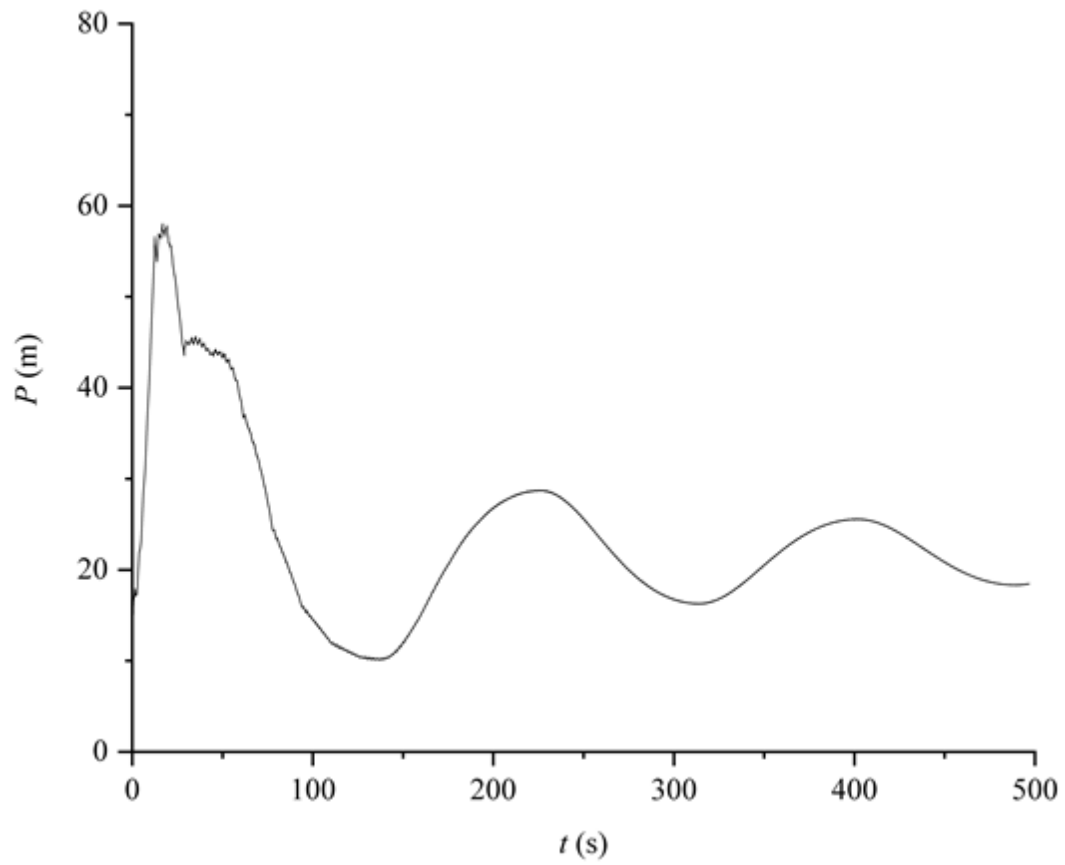


Fig. 8. Andamento della pressione alla base del pozzo piezometrico

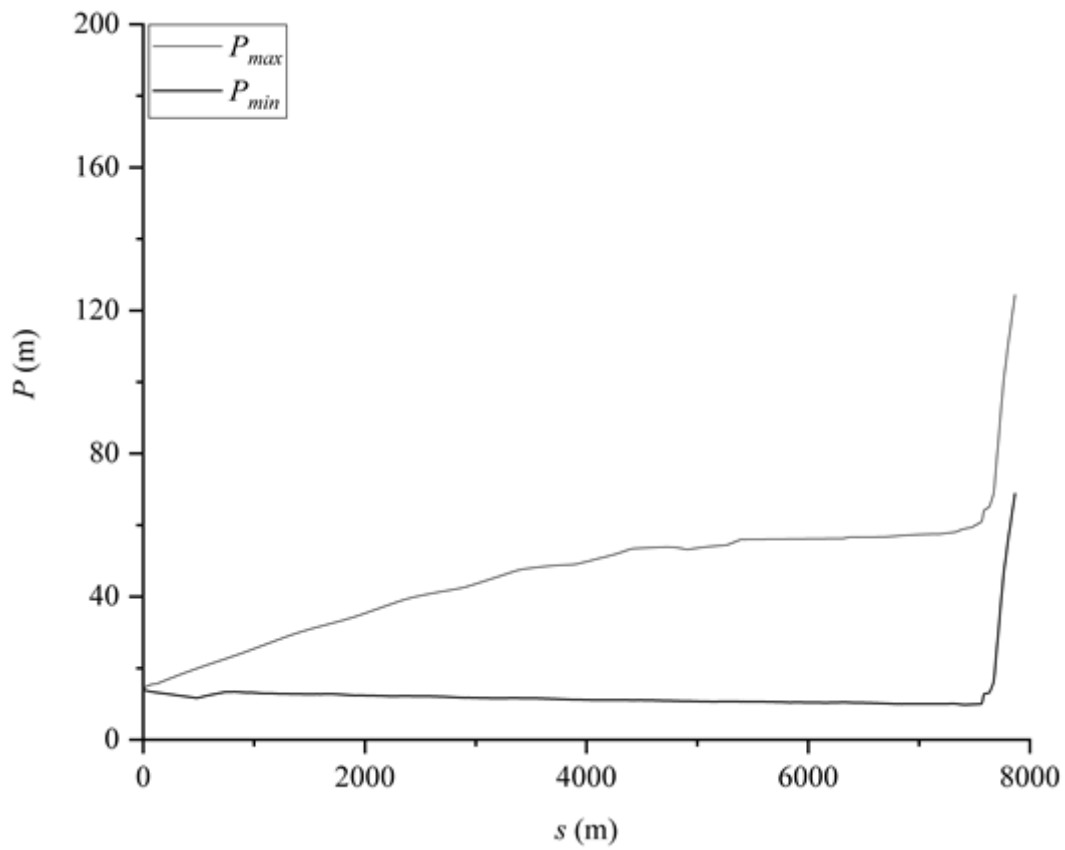


Fig. 9. Involuppo delle pressioni massime e minime lungo la galleria e la condotta forzata

Anche le verifiche dello spessore assegnato alla galleria e alla condotta forzata, effettuate con riferimento alle più gravose condizioni di funzionamento, hanno dato esito pienamente positivo.

4.2 MANOVRE DI CHIUSURA TOTALE

Una volta completata la verifica della risposta idraulica del pozzo piezometrico nelle condizioni di funzionamento previste per l'impianto, si è ritenuto opportuno, a vantaggio di sicurezza, verificare il sistema galleria - pozzo piezometrico - condotta forzata con riferimento ad una più gravosa manovra di chiusura totale, per cui nella durata di 12 s la portata si riduce linearmente dal valore massimo di regime ($7.60 \text{ m}^3/\text{s}$) al valore nullo. I risultati delle simulazioni effettuate, relativamente alle condizioni di massimo e minimo invaso, sono sintetizzati nel seguito.

4.2.1 MASSIMO INVASO - MANOVRA DI CHIUSURA TOTALE

Le simulazioni sono state effettuate considerando una quota di pelo libero nel serbatoio pari a 377.25 m s.l.m.. Le Figure 10÷12 riportano rispettivamente, per la condizione di massimo invaso, l'andamento dei livelli idrici all'interno del pozzo riferiti alla base del pozzo medesimo, della pressione alla base del pozzo, dell'involuppo delle pressioni massime e minime lungo la galleria e la condotta forzata.

I valori significativi desunti dalle simulazioni sono di seguito riportati:

- massimo sovrizzo nel pozzo: 60.56 m
- minimo sovrizzo nel pozzo: 21.53 m
- massima pressione alla base del pozzo: 90.84 m
- minima pressione alla base del pozzo: 26.84 m
- massima pressione in galleria: 90.84 m
- minima pressione in galleria: 26.66 m
- massima pressione in condotta forzata: 159.11 m
- minima pressione in condotta forzata: 26.42 m

Con specifico riferimento alla Figura 10, può evincersi che il livello idrico massimo all'interno del pozzo corrisponde ad una quota pari a 404.04 m. s.l.m., ancora ben lontana dalla sommità del pozzo, situata alla quota di 415.57 m s.l.m., con un franco pari a 11.53 m; risulta altresì molto elevato il franco rispetto all'imbocco della galleria forzata.

Per quanto concerne la verifica dello spessore, in particolare per quanto concerne la condotta forzata, assoggettata nella sua sezione terminale ad una pressione di circa 15.91 bar (Fig. 12), essa risulta largamente soddisfatta. Infatti, dalla citata relazione (4), applicata con riferimento alla ben più gravosa pressione di collaudo (pari a 1.5 volte la pressione calcolata), risulta uno spessore di calcolo pari a 14.63 mm, a fronte dei 16 mm previsti. Analogamente per la galleria, assoggettata ad una pressione massima di 9.08 bar, lo spessore corrispondente alla pressione di collaudo è pari a 8.87 mm, a fronte di uno spessore di progetto di 12.7 mm.

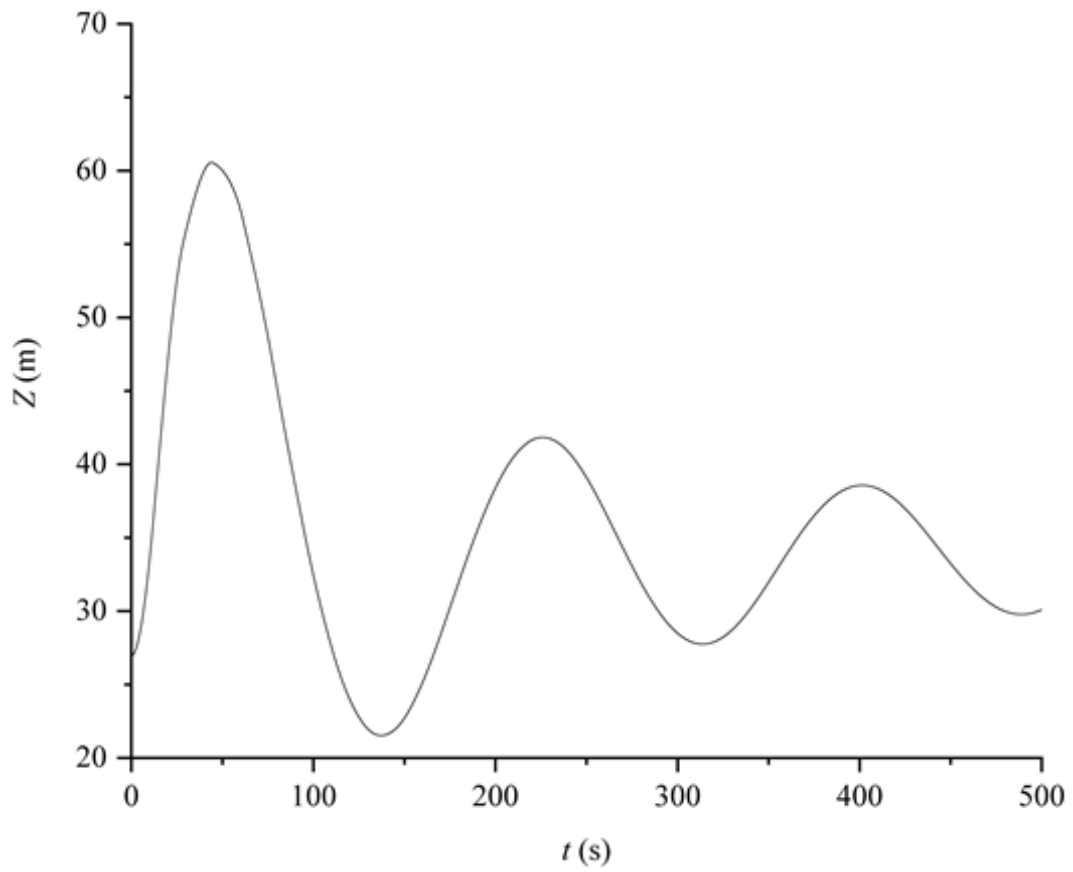


Fig. 10. Andamento dei livelli idrici nel pozzo piezometrico

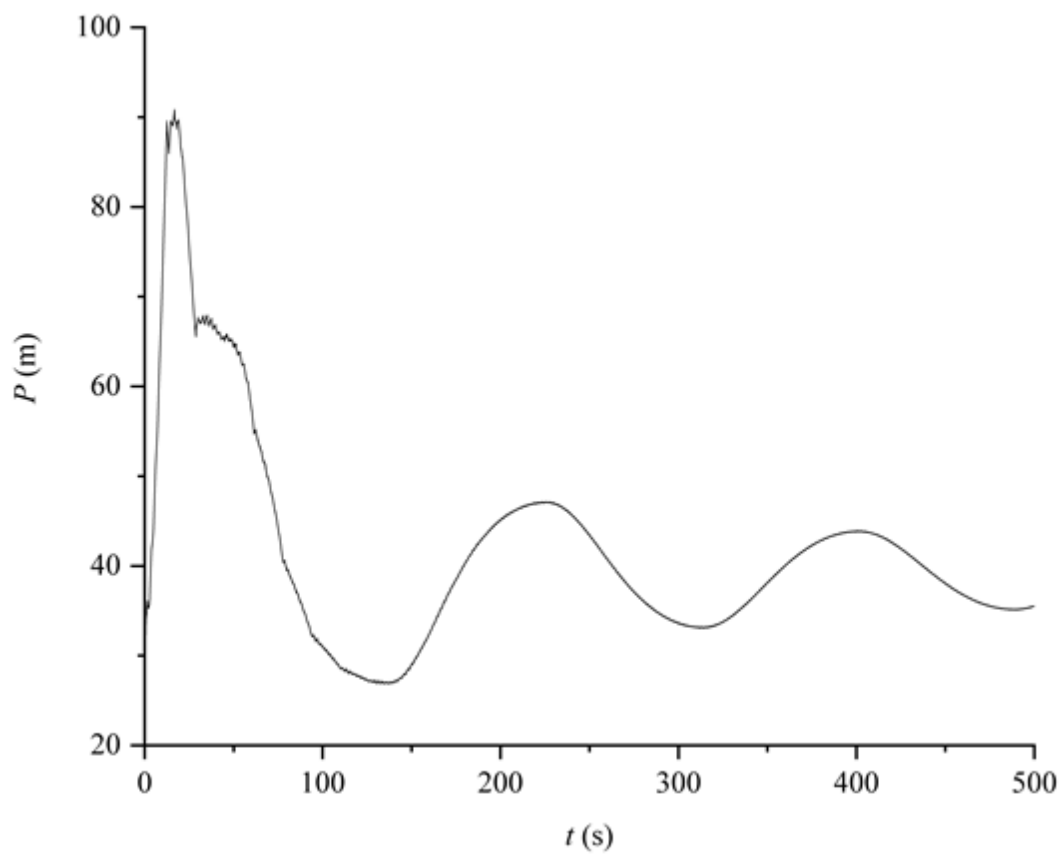


Fig. 11. Andamento della pressione alla base del pozzo piezometrico

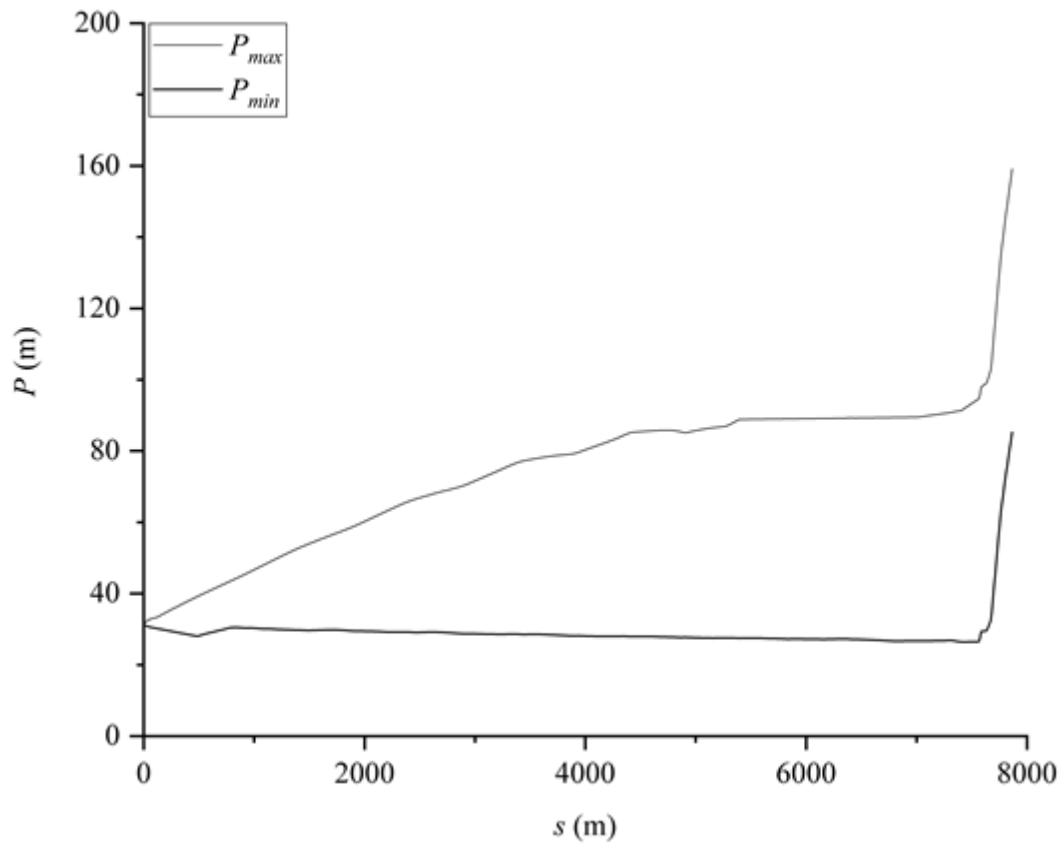


Fig. 12. Inviluppo delle pressioni massime e minime lungo la galleria e la condotta forzata

4.2.2 MINIMO INVASO - MANOVRA DI CHIUSURA TOTALE

Le simulazioni sono state condotte considerando una quota di pelo libero nel serbatoio pari a 360.00 m s.l.m.. Le Figure 13÷15 riportano rispettivamente, per la condizione di minimo invaso, l'andamento dei livelli idrici all'interno del pozzo, della pressione alla base del pozzo, dell'inviluppo delle pressioni massime e minime lungo la galleria e la condotta forzata.

I valori significativi desunti dalle simulazioni sono di seguito riportati:

- massimo sovrizzo nel pozzo: 43.31 m
- minimo sovrizzo nel pozzo: 4.28 m
- massima pressione alla base del pozzo: 73.62 m
- minima pressione alla base del pozzo: 9.62 m
- massima pressione in galleria: 73.62 m
- minima pressione in galleria: 9.43 m
- massima pressione in condotta forzata: 141.89 m
- minima pressione in condotta forzata: 9.20 m

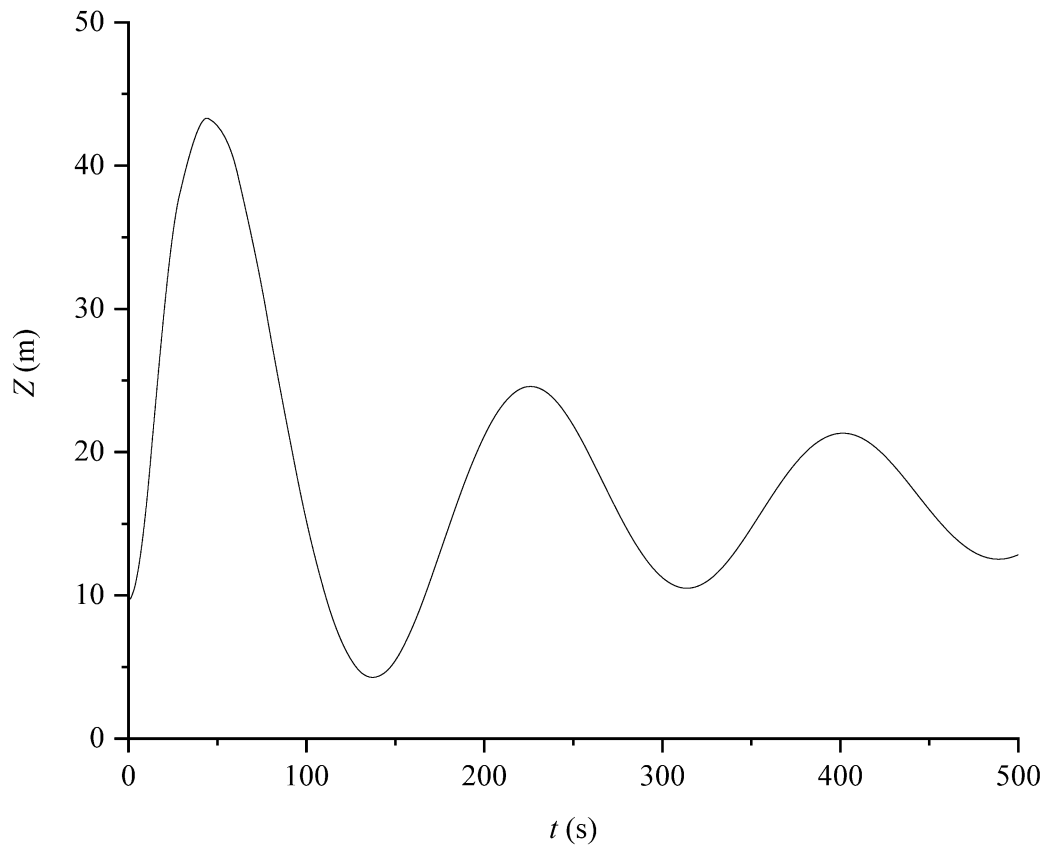


Fig. 13. Andamento dei livelli idrici nel pozzo piezometrico

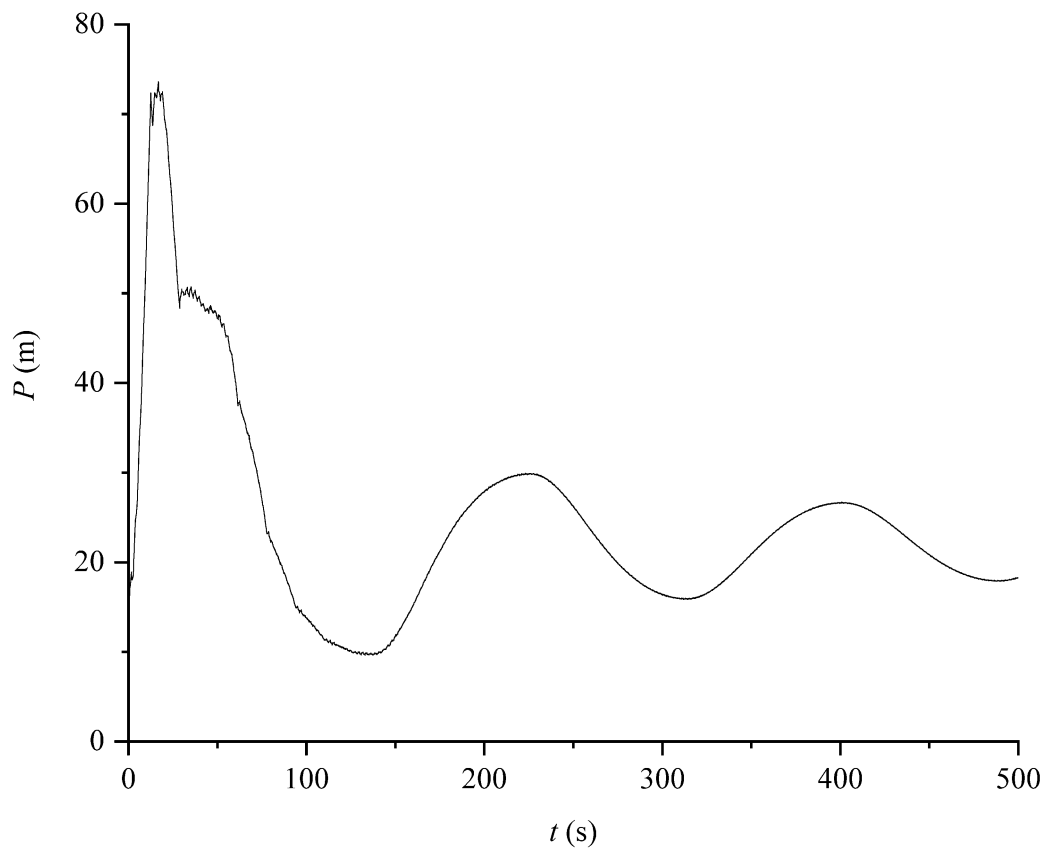


Fig. 14. Andamento della pressione alla base del pozzo piezometrico

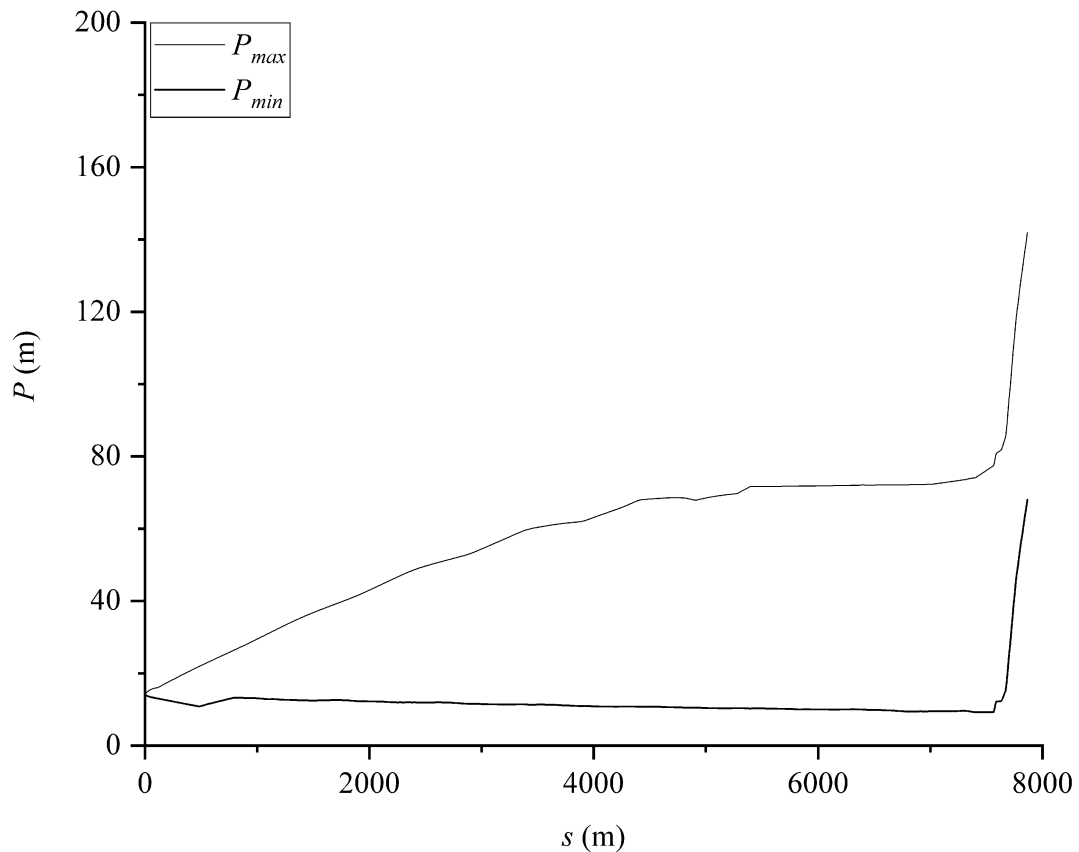


Fig. 15. Involuppo delle pressioni massime e minime lungo galleria e condotta forzata

Come già osservato, la manovra di chiusura (in questo caso totale) con serbatoio al minimo invaso è particolarmente temibile per la possibilità che le oscillazioni di livello idrico diano luogo alla scoperta della condotta forzata e all'ingresso di aria in essa. Dalla Figura 13 si evince che il livello idrico minimo all'interno del pozzo piezometrico corrisponde ad una quota pari a 347.76 m s.l.m., con un margine di sicurezza di 4.28 m rispetto alla base del pozzo e di 8.99 m rispetto alla generatrice superiore della condotta forzata nella sezione d'imbocco, posta alla quota di 338.77 m s.l.m..

Non vi sono ovviamente problemi di sorta per quanto concerne la verifica dello spessore della condotta forzata, assoggettata nella sua sezione terminale ad una pressione di circa 14.2 bar, e della galleria, soggetta a una pressione massima di 7.36 bar (Fig. 15). Alle pressioni di collaudo corrispondono uno spessore pari a 13.19 mm per la condotta forzata e a 7.40 mm per la galleria, largamente inferiori agli spessori di progetto, rispettivamente di 16 e 12.7 mm.

4.2.3 MINIMO INVASO - MANOVRA DI CHIUSURA TOTALE A TUBI USATI

A scopo cautelativo, la manovra di chiusura totale a partire dalle condizioni di minimo invaso (cioè considerando la quota di pelo libero nel serbatoio a 360.00 m s.l.m.) è stata effettuata anche per la condizione di tubi usati.

La suddetta condizione d'invaso, come più volte osservato, è particolarmente temibile per la possibilità che le oscillazioni del livello idrico diano luogo alla scoperta della condotta forzata e alla

conseguente immissione di aria. La simulazione a tubi nuovi consente di “smorzare” l’effetto delle resistenze al moto, massimizzando l’entità delle oscillazioni. Va, però considerato anche che, nella suddetta condizione, le perdite di carico, pari a 6.77 m, definiscono un livello idrico nel pozzo nell’istante iniziale della manovra pari a 353.23 m s.l.m.. Nella condizione di tubi usati, invece, le perdite di carico risultano pari a 10.91 m, definendo un livello di pelo libero nel pozzo di 349.09 m s.l.m., potenzialmente più pericoloso.

È sembrato, quindi, opportuno prendere in esame anche la suddetta manovra, riportando nelle Figure 16÷18 rispettivamente l’andamento dei livelli idrici all’interno del pozzo, della pressione alla base del pozzo, dell’involuppo delle pressioni massime e minime lungo la galleria e la condotta forzata.

I valori significativi desunti dalle simulazioni sono di seguito riportati:

- massimo sovralzo nel pozzo: 40.61 m
- minimo sovralzo nel pozzo: 5.02 m (maggiore del valore ricavato nell’ipotesi di tubi nuovi)
- massima pressione alla base del pozzo: 70.00 m
- minima pressione alla base del pozzo: 10.39 m
- massima pressione in galleria: 70.00 m
- minima pressione in galleria: 10.22 m
- massima pressione in condotta forzata: 138.01 m
- minima pressione in condotta forzata: 10.07 m

La manovra a tubi usati presa in esame appare, quindi, nel complesso, di minore “pericolosità” rispetto a quella a tubi nuovi considerata in precedenza.

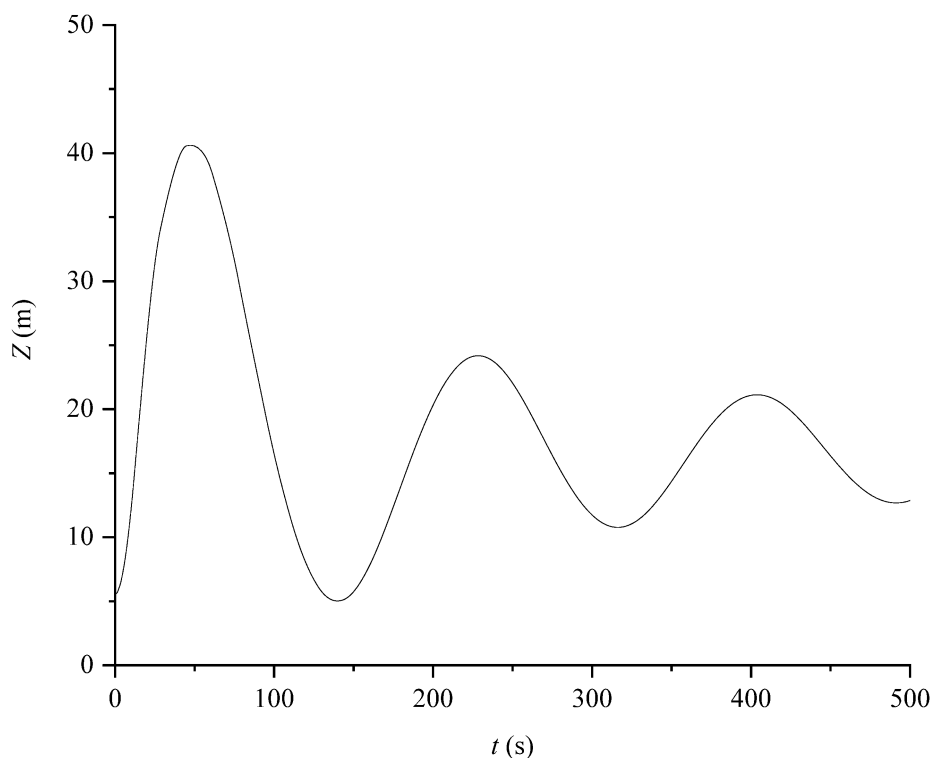


Fig. 16. Andamento dei livelli idrici nel pozzo piezometrico

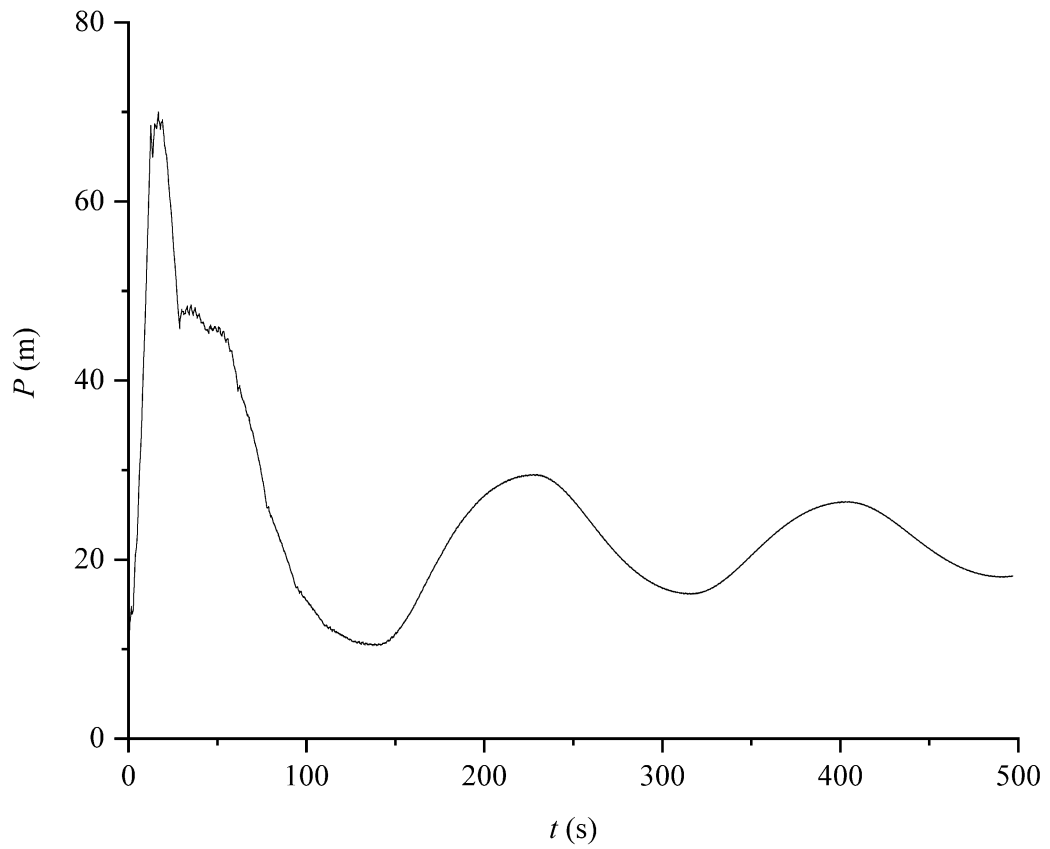


Fig. 17. Andamento della pressione alla base del pozzo piezometrico

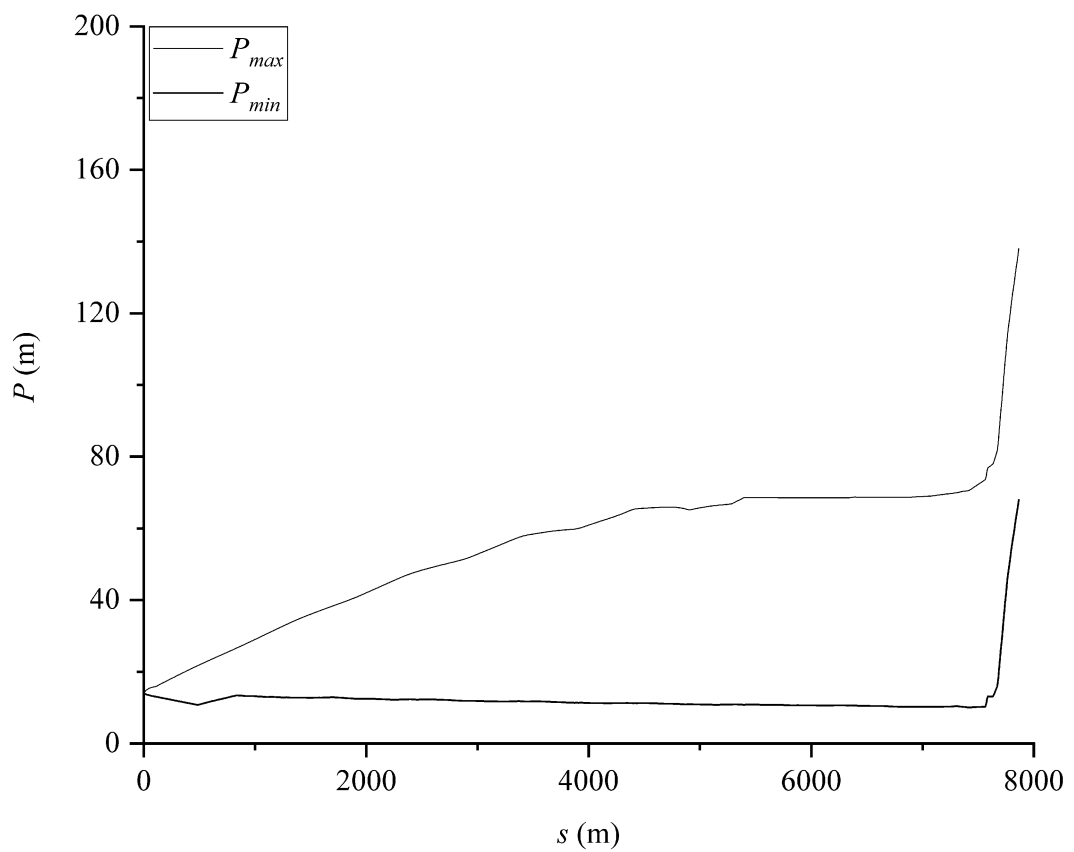


Fig. 18. Involuppo delle pressioni massime e minime lungo galleria e condotta forzata

Nel complesso, quindi, può ritenersi che il pozzo piezometrico, nell'assetto progettuale proposto, assicuri condizioni di funzionamento più che soddisfacenti: dalle simulazioni effettuate, infatti, con riferimento alle condizioni sia di massimo che di minimo invaso, sono stati desunti valori dal massimo e del minimo livello idrico del pozzo assolutamente compatibili. In maggior dettaglio, il franco rispetto alla sommità del pozzo risulta pari a 16.12 m per le condizioni di massimo invaso, e a 4.71 m rispetto alla base del pozzo e a 9.42 m rispetto alla generatrice superiore della condotta forzata nella sezione d'imbocco per le condizioni di minimo invaso.

Anche le verifiche dello spessore assegnato alla galleria e alla condotta forzata, effettuate con riferimento alle più gravose condizioni di funzionamento (inclusa la manovra di chiusura totale), hanno dato esito pienamente positivo

4.3 MANOVRA DI APERTURA PARZIALE - MINIMO INVASO

Tale verifica è stata effettuata considerando la quota di pelo libero nel serbatoio pari a 360.00 m s.l.m. (minimo invaso) ed assumendo la condizione di tubi usati. La verifica è stata effettuata per individuare una durata minima della manovra di apertura parziale (da 1.50 m³/s a 7.60 m³/s) che assicuri un livello idrico sufficientemente elevato sulla base del pozzo, evitando il rischio d'ingresso di aria nel sistema. La durata t della manovra, assunta ancora lineare, è stata fissata pari a 200 s, 400 s e 600 s, ed i corrispondenti andamenti dei livelli idrici nel pozzo piezometrico sono stati riportati nelle Figure 19÷21.

Dall'analisi delle Figure 19÷21 risulta, quindi, per $t=200$ s, un sovrizzo minimo rispetto alla base del pozzo pari a 1.17 m, per $t=400$ s un valore di 2.86 m, per $t=600$ s un valore di 3.74 m, cui corrisponde un franco rispetto alla generatrice superiore della sezione d'imbocco della condotta forzata pari, rispettivamente, a 5.88 m ($t=200$ s), 7.57 m ($t=400$ s) e 8.45 m ($t=600$ s).

Appare, quindi, consigliabile prevedere una durata cautelativa della manovra di apertura non inferiore a 10 minuti.

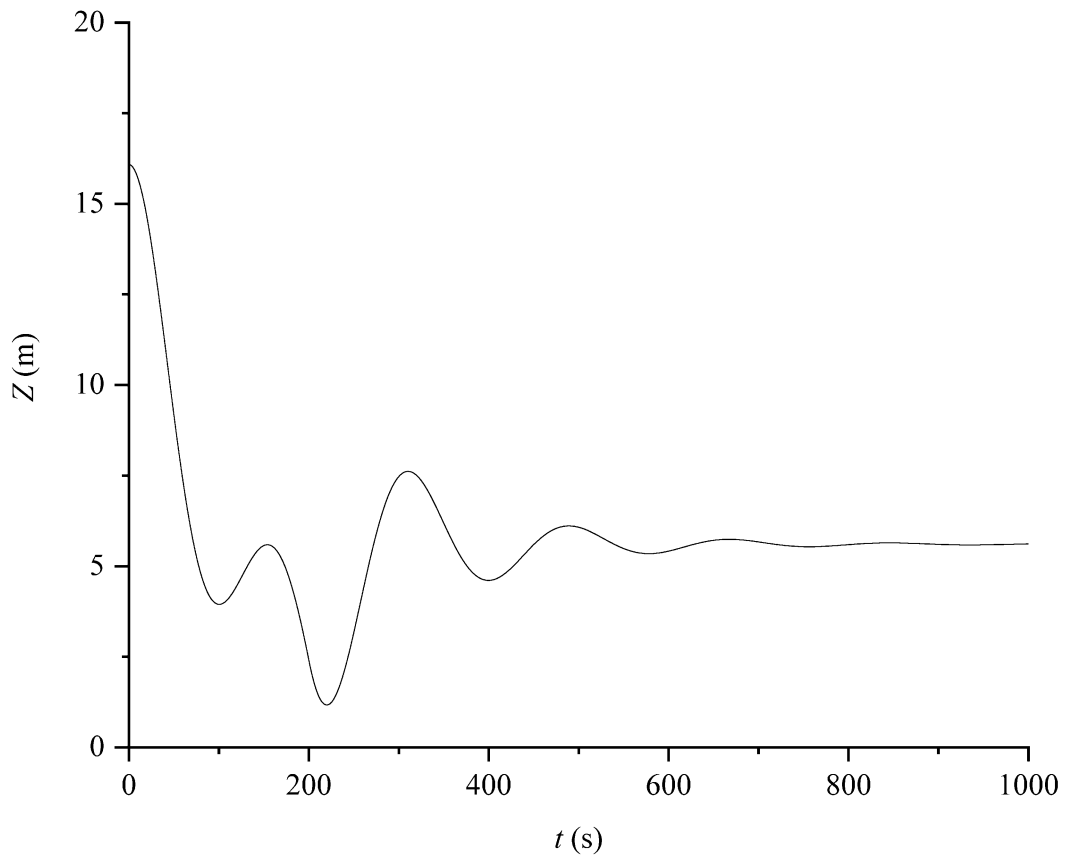


Fig. 19. Andamento dei livelli idrici nel pozzo piezometrico (manovra di apertura parziale, $t=200$ s)

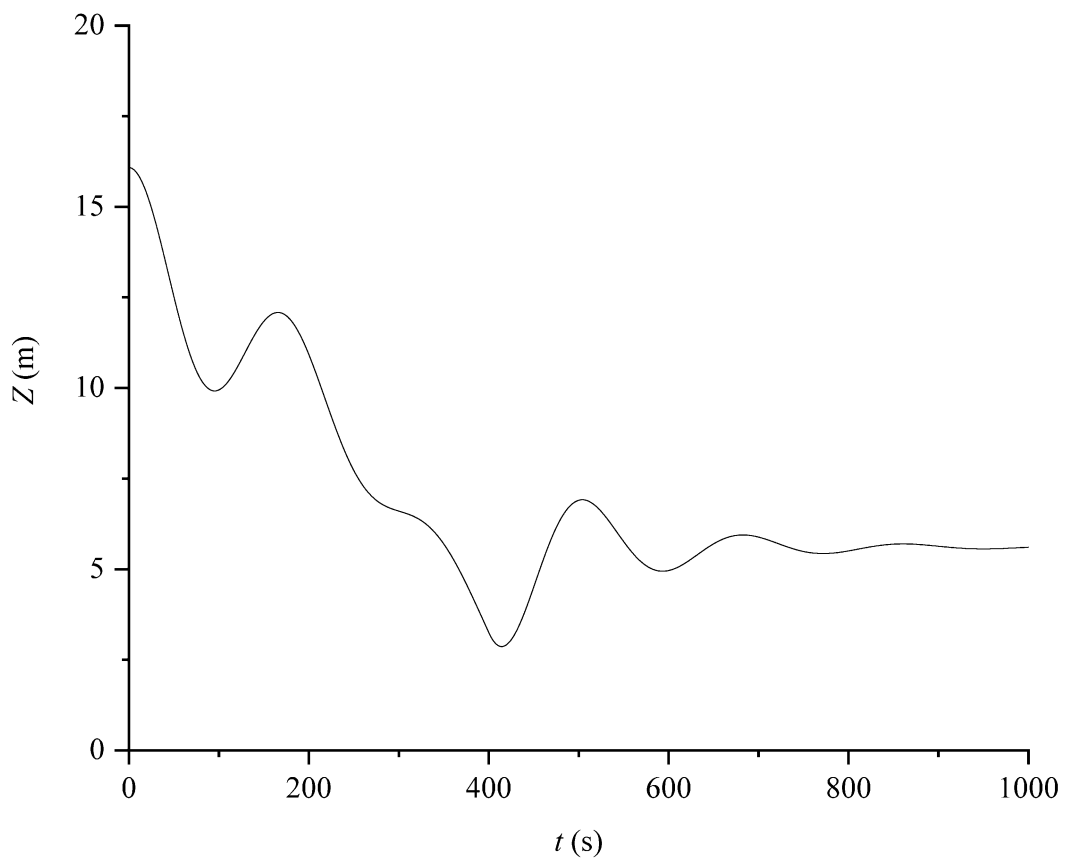


Fig. 20. Andamento dei livelli idrici nel pozzo piezometrico (manovra di apertura parziale, $t=400$ s)

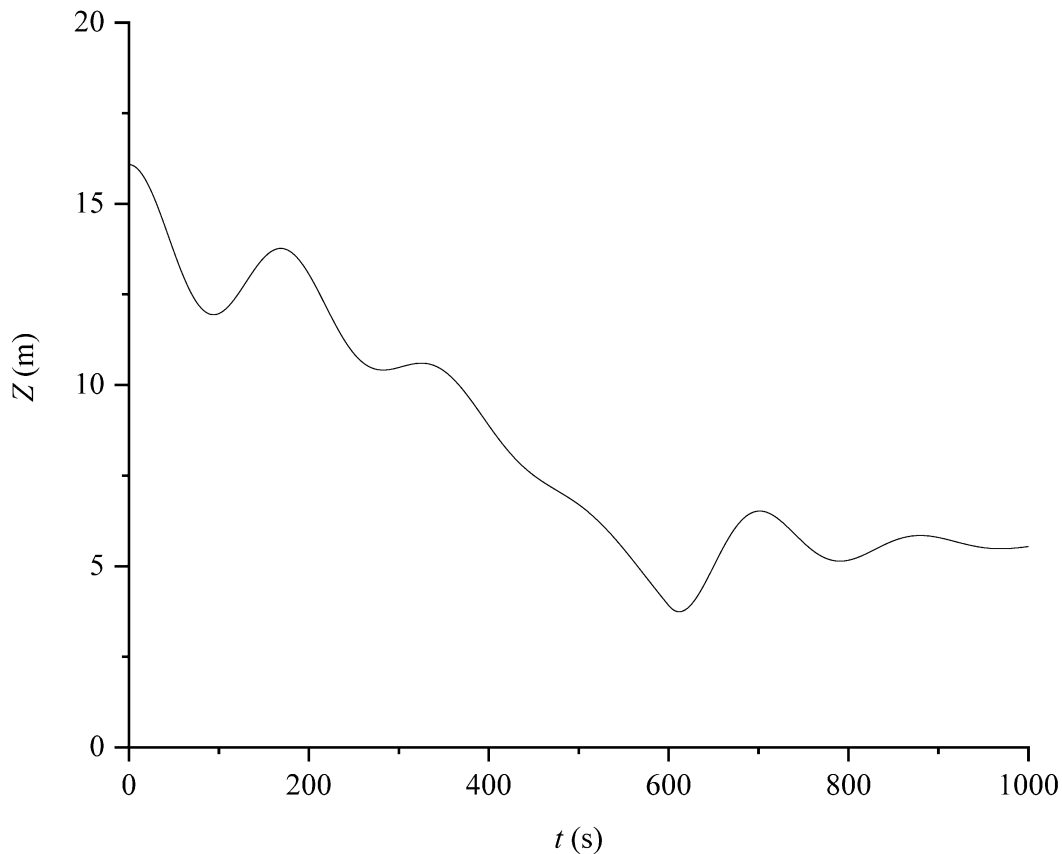


Fig. 21. Andamento dei livelli idrici nel pozzo piezometrico (manovra di apertura parziale, t=600 s)

5. SCENARI DI EMERGENZA

Si è, inoltre, proceduto alla simulazione di alcuni scenari di emergenza fissati dalla Direzione generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche, con riferimento ad un ipotetico collasso della galleria o della condotta forzata, ad esempio a causa di un evento sismico. In particolare, sono stati presi in esame 3 diversi scenari, sinteticamente descritti di seguito:

- Scenario 1, corrispondente alla rottura della galleria forzata immediatamente a valle della valvola di sicurezza indicata con il n. 1, posta poco a valle della sezione di presa.
- Scenario 2, corrispondente alla rottura della galleria forzata immediatamente a monte del pozzo piezometrico.
- Scenario 3, corrispondente alla rottura della condotta forzata immediatamente a monte della centrale idroelettrica. La simulazione di quest'ultimo scenario, in particolare, risulta necessaria anche ai fini del dimensionamento del volume di accumulo da prevedere per la raccolta delle acque scaricate dalla condotta durante il transitorio ed il suo successivo svuotamento.

Le valvole di sicurezza previste in progetto, del diametro DN 1800 mm, sono del tipo a contrappeso e consentono di assegnare la durata della manovra di chiusura, con un limite tecnico di circa 5 s.

Nel seguito sono descritti i risultati desunti dalle simulazioni con riferimento a ciascuno scenario, effettuate mediante le equazioni del moto vario elastico già illustrate in precedenza.

5.1 SCENARIO 1

Lo scenario 1 prevede la rottura della galleria forzata (DN 2200) immediatamente a valle della valvola di sicurezza n. 1, ubicata poco a valle della sezione di presa (Fig. 22).

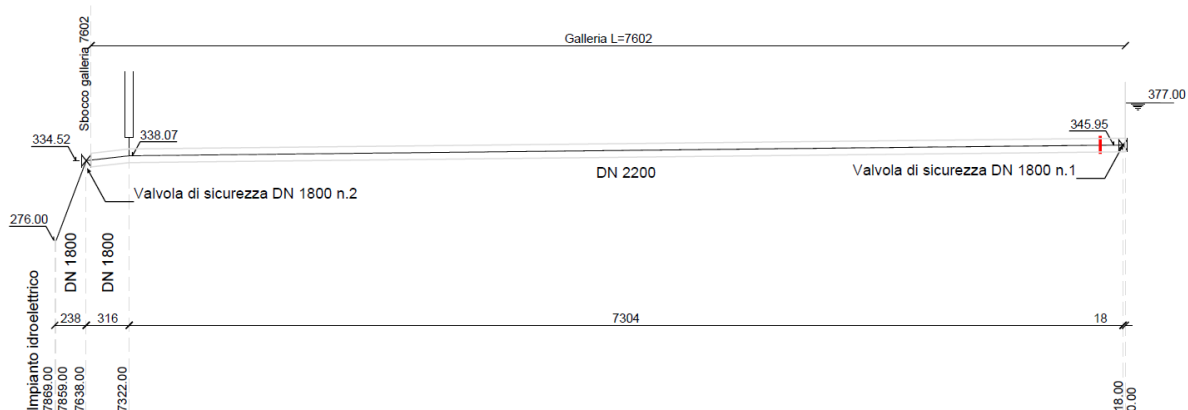


Fig. 22. Scenario n. 1

La simulazione è stata condotta facendo riferimento alla condizione di massimo invaso nel serbatoio (livello idrico alla quota di 377.25 m s.l.m.) e per tubi usati, ipotizzando l'annullamento della pressione in corrispondenza del pozzo piezometrico (pressione atmosferica) a causa della rottura in un tempo estremamente ridotto (1 secondo). La manovra di chiusura della valvola di sicurezza viene comandata quando la portata defluente nella sezione della valvola stessa supera il valore di $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$: la manovra ha una durata, definita sulla scorta dei risultati desunti dalle simulazioni, pari a 14 s, con una variazione sostanzialmente lineare della portata. È stato assegnato per l'avvio della manovra un valore della portata pari a $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$ sufficientemente più alto della portata massima prevista in galleria ($7.6 \text{ m}^3/\text{s}$), in modo da evitare un possibile azionamento imprevisto della valvola a seguito delle inevitabili fluttuazioni di portata in galleria conseguenti all'esercizio del sistema.

I risultati più significativi delle simulazioni, effettuate come già precisato mediante le equazioni del moto vario elastico illustrate in precedenza, sono riportati nelle successive Figure 23 e 24. In particolare, la Figura 23 riporta l'involuppo delle pressioni massime e minime nel sistema a monte della valvola di sicurezza, la cui entità non desta alcuna preoccupazione. In Figura 24, invece, è stata riportata la variazione nel tempo della portata defluente attraverso la valvola a seguito della rottura della galleria forzata: la portata massima risulta di poco superiore a $14 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre il volume idrico complessivamente defluito dalla valvola nel corso del transitorio è lievemente superiore all'incirca a 90 m^3 . Il volume complessivamente scaricato risulta tuttavia maggiore, in considerazione del fatto che, atteso il profilo della condotta DN 2200, un'aliquota del volume

da essa contenuto, pari a circa 4000 m^3 , viene scaricato successivamente a gravità nella galleria, per un valore complessivo dell'ordine di 4100 m^3 .

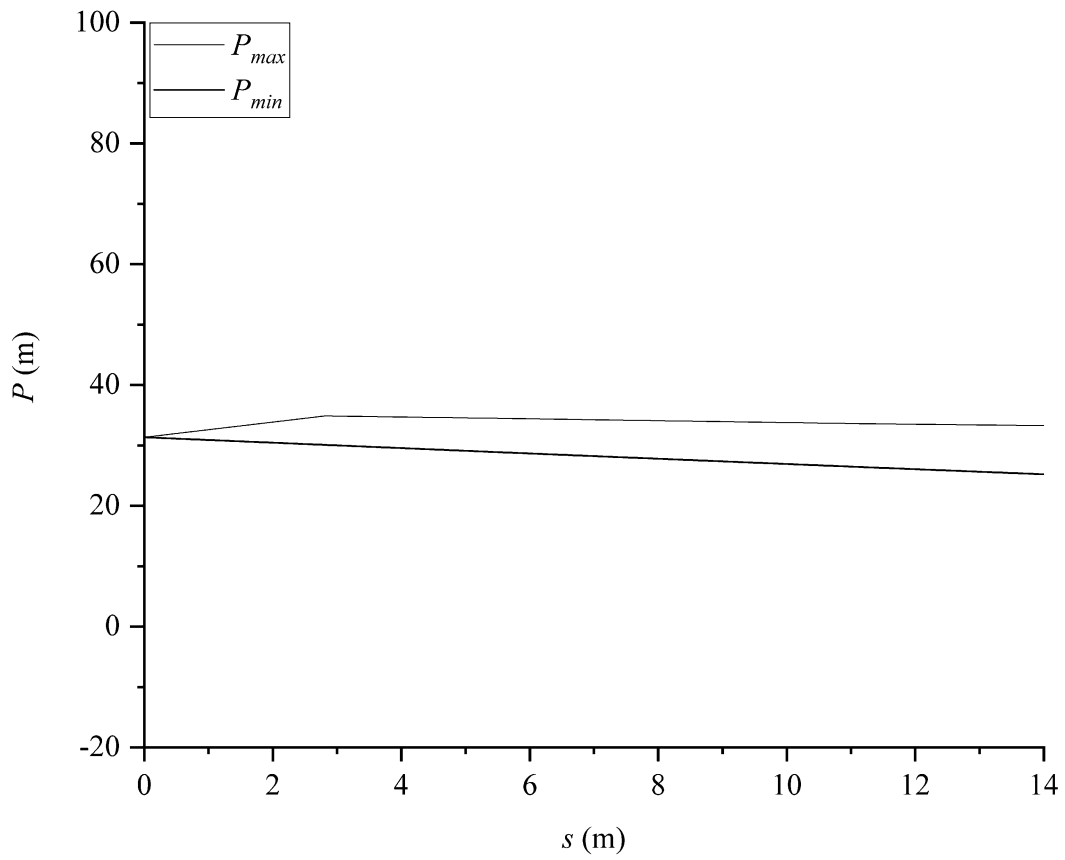


Fig. 23. Scenario 1: inviluppo delle pressioni massime e minime a monte della valvola di sicurezza n. 1

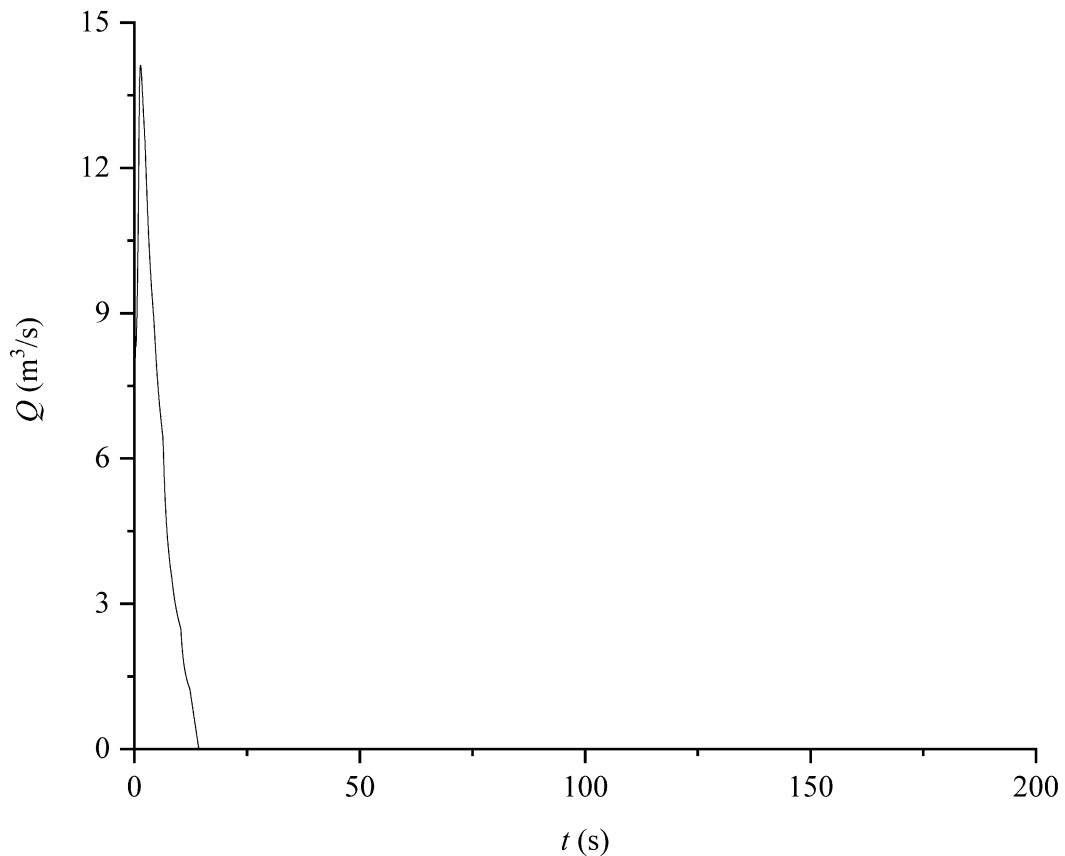


Fig. 24. Scenario 1: andamento della portata defluente attraverso la valvola di sicurezza n. 1

5.2 SCENARIO 2

Lo scenario 2 prevede la rottura della galleria forzata DN 2200 immediatamente a monte del pozzo piezometrico e la chiusura, causata dall'incremento di portata in condotta, della valvola di sicurezza n. 1, ubicata poco a valle della presa (Fig. 25). La simulazione è stata condotta facendo riferimento alla condizione di massimo invaso nel serbatoio (livello idrico pari a 377.25 m s.l.m.) e per tubi usati, ipotizzando ancora l'annullamento della pressione in corrispondenza del pozzo piezometrico (pressione atmosferica) in un tempo estremamente ridotto (1 secondo). La manovra di chiusura della valvola di sicurezza n. 1 viene attivata quando la portata defluente in corrispondenza della valvola supera il valore di $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$, con una durata di 14 s e assicurando una variazione sostanzialmente lineare della portata.

I risultati più significativi delle simulazioni sono stati riportati nelle Figure 26 e 27. In particolare, la Figura 26 riporta l'involuppo delle pressioni massime e minime nel sistema a monte della valvola di sicurezza, anche in questo secondo scenario di entità tale da non destare preoccupazioni. In Figura 27 è stato, invece, riportato l'andamento nel tempo della portata defluente attraverso la valvola di sicurezza n. 1 a seguito della rottura della condotta. La portata massima risulta in tal caso di poco inferiore a $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre il volume complessivamente defluito attraverso la valvola nel corso del transitorio è pari a circa 90 m^3 .

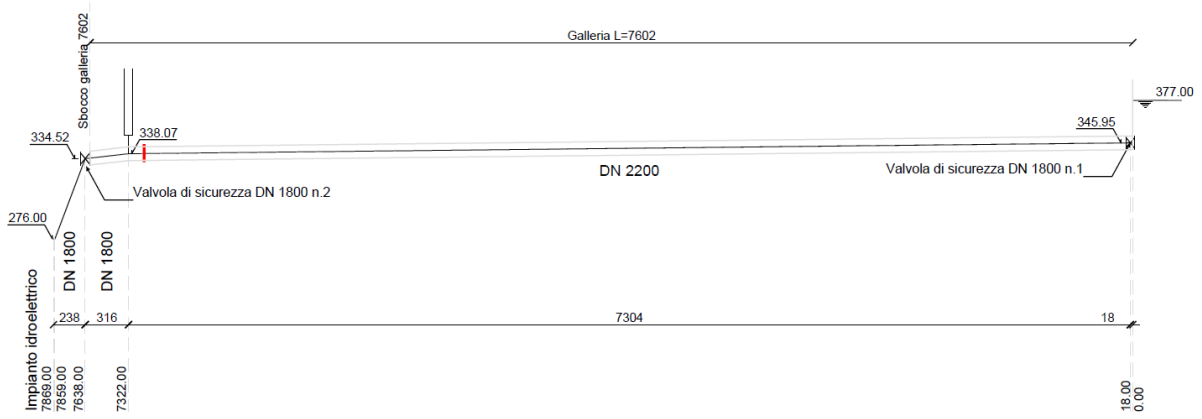


Fig. 25. Scenario n. 2

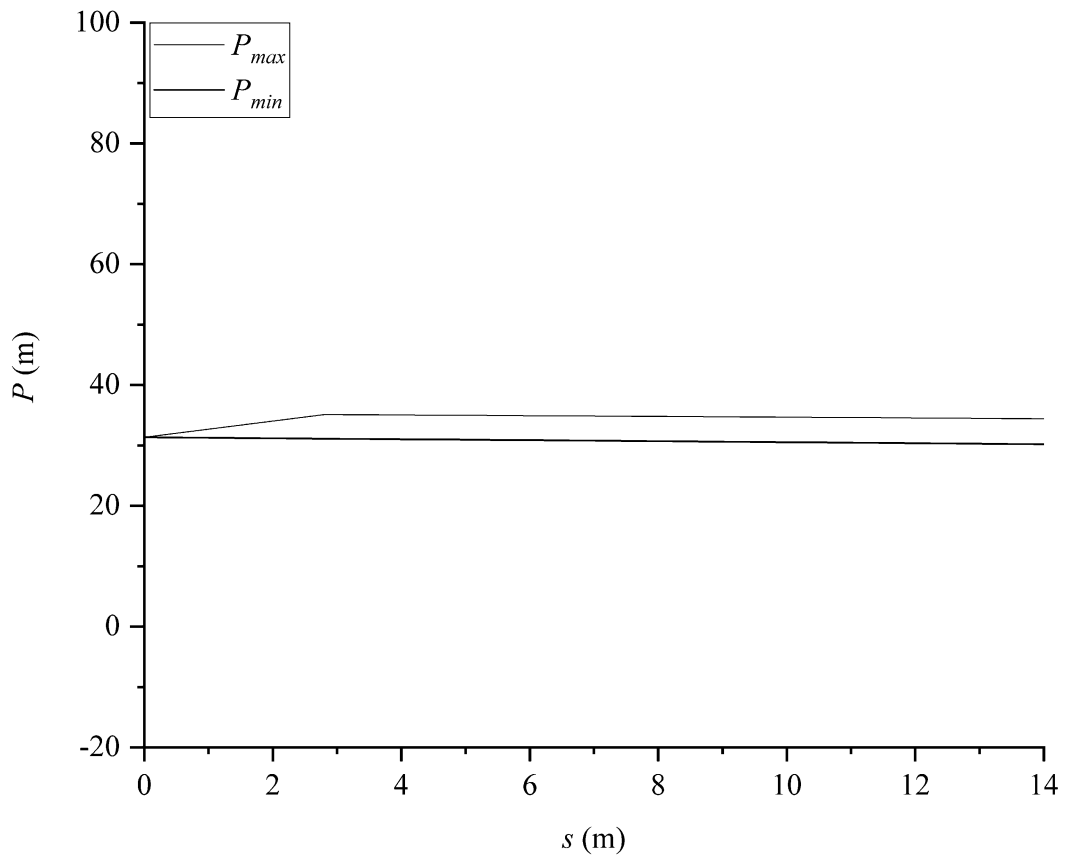


Fig. 26. Scenario 2: involucro delle pressioni massime e minime a monte della valvola di sicurezza n. 1

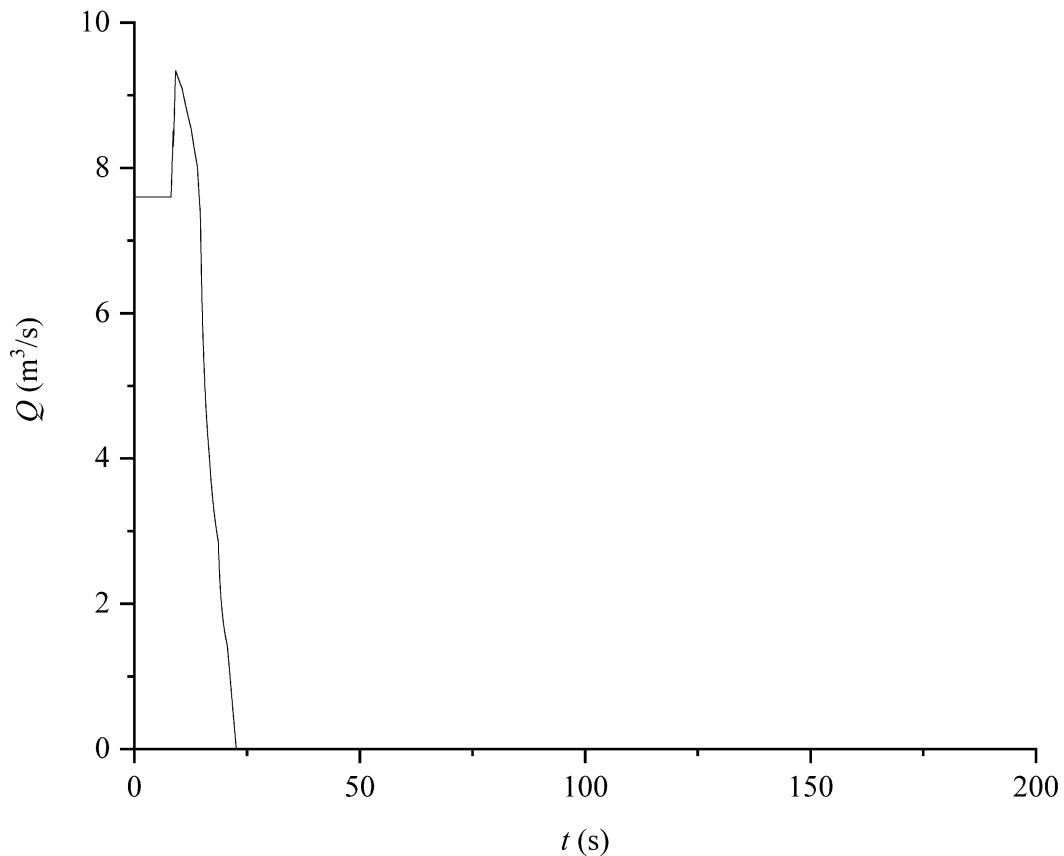


Fig. 27. Scenario 2: andamento della portata defluente attraverso la valvola di sicurezza n. 1

Il volume complessivamente scaricato risulta, tuttavia, significativamente maggiore, a causa del contributo derivante dallo svuotamento dell'intera condotta DN 2200 e del pozzo piezometrico. La condotta presenta un volume di oltre 28.000 m³, mentre il contributo derivante dal pozzo risulta di poco superiore a 100 m³, per un totale complessivo dell'ordine di 28.500 m³.

5.3 SCENARIO 3

Nello scenario 3 si analizza il transitorio derivante dalla rottura della condotta forzata DN 1800 e dalla conseguente chiusura della valvola di sicurezza n. 2, ubicata circa 320 m a valle del pozzo piezometrico (Fig. 28). La simulazione è stata ancora effettuata con riferimento alla condizione di massimo invaso nel serbatoio (livello idrico pari a 377.25 m s.l.m.) e per tubi usati, ipotizzando che a seguito della rottura la pressione in corrispondenza dell'otturatore (cioè in centrale) si annulli (pressione atmosferica) in un tempo estremamente ridotto (1 secondo). La chiusura della valvola di sicurezza viene attivata quando la portata defluente in corrispondenza della valvola supera il valore di 8.5 m³/s, e la manovra è caratterizzata da una durata di 14 s e da una variazione sostanzialmente lineare della portata.

I risultati più significativi delle simulazioni sono stati riportati nelle Figure 29 e 30. In particolare, la Figura 29 riporta l'involuppo delle pressioni massime e minime nel sistema a monte della valvola di sicurezza n. 2,

mentre in Figura 30 è stata riportata la variazione nel tempo della portata defluente attraverso la valvola a seguito della rottura della condotta forzata DN 1800.

La Figura 29 mette in evidenza un andamento delle pressioni che, pur risultando di entità significativamente maggiore rispetto agli scenari precedenti, non desta preoccupazioni per quanto concerne l'integrità del sistema condotta forzata-galleria forzata.

Dalla Figura 30 risulta, invece, che la portata defluente attraverso la valvola di sicurezza n. 2 supera il valore di soglia di $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$ dopo circa 1 s dall'inizio del transitorio, per cui la chiusura completa si verifica in un tempo di circa 15 s. Inoltre, nel corso del transitorio la portata massima risulta di poco inferiore a $10 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre il volume complessivamente defluito attraverso la valvola nel corso del transitorio è pari a circa 90 m^3 . Il volume complessivamente scaricato dovrà ovviamente tener conto anche di quello presente nella condotta forzata a valle della valvola di sicurezza, pari a circa 600 m^3 , per un totale complessivo dell'ordine di 700 m^3 .

Infine, la Figura 31 riporta l'andamento dei livelli idrici nel pozzo piezometrico, da cui emerge chiaramente che, nel corso del transitorio, il massimo livello si mantiene ben al di sotto della sommità del pozzo (situata alla quota di 415.57 m s.l.m.), né si verificano condizioni che possono condurre all'ingresso di aria nel sistema.

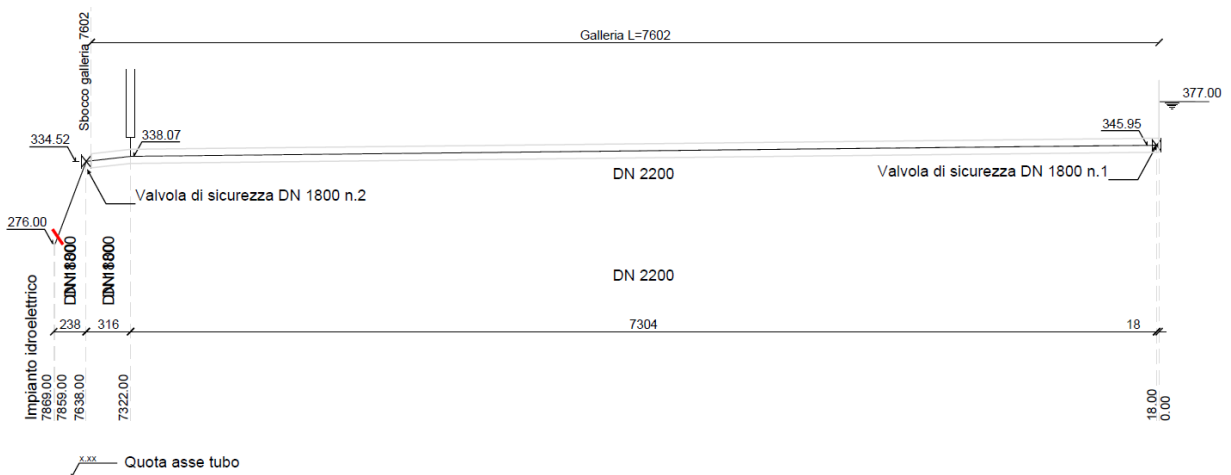


Fig. 28. Scenario n. 3

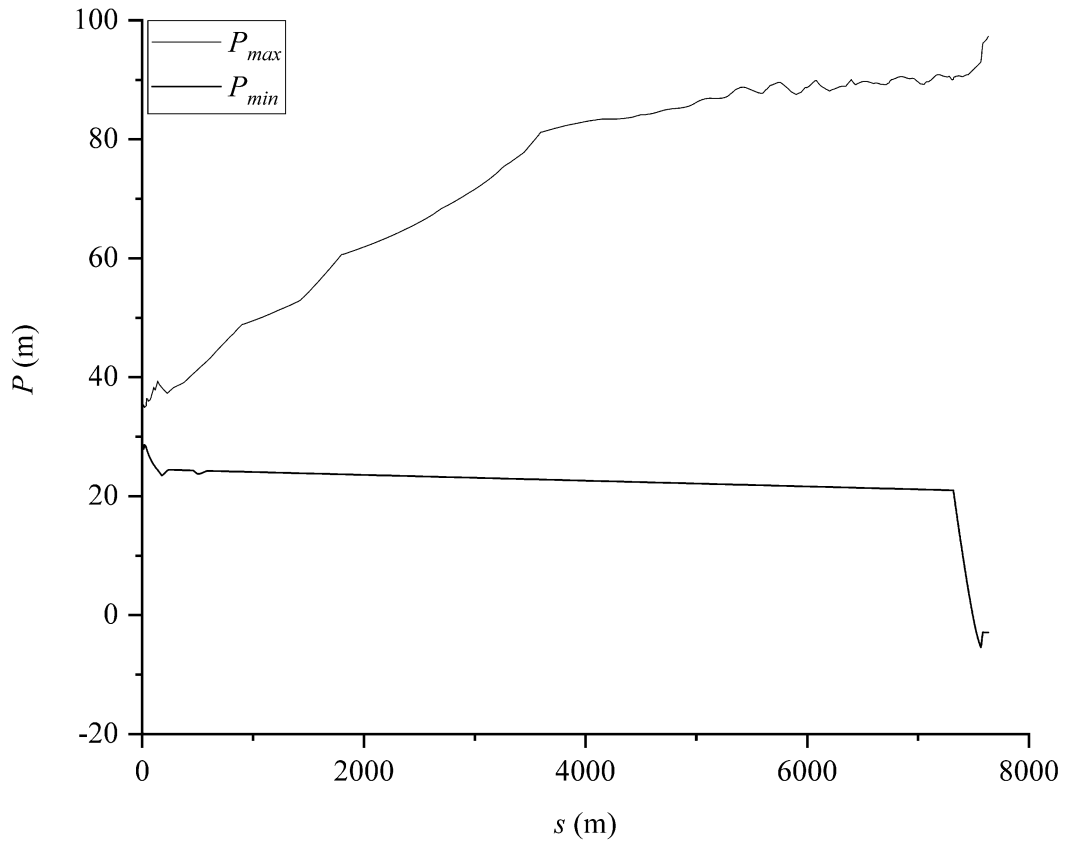


Fig. 29. Scenario n. 3: inviluppo delle pressioni massime e minime a monte della valvola di sicurezza n. 2

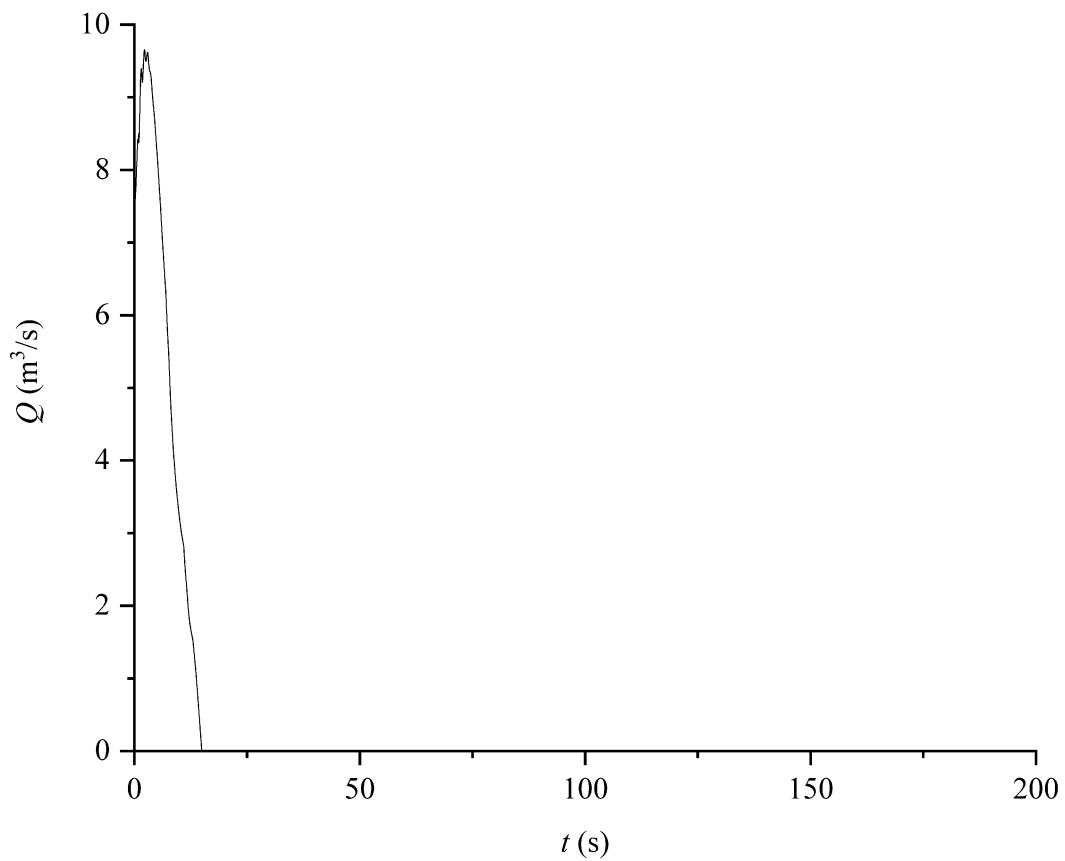


Fig. 30. Scenario n. 3: andamento della portata defluente attraverso la valvola di sicurezza n. 2

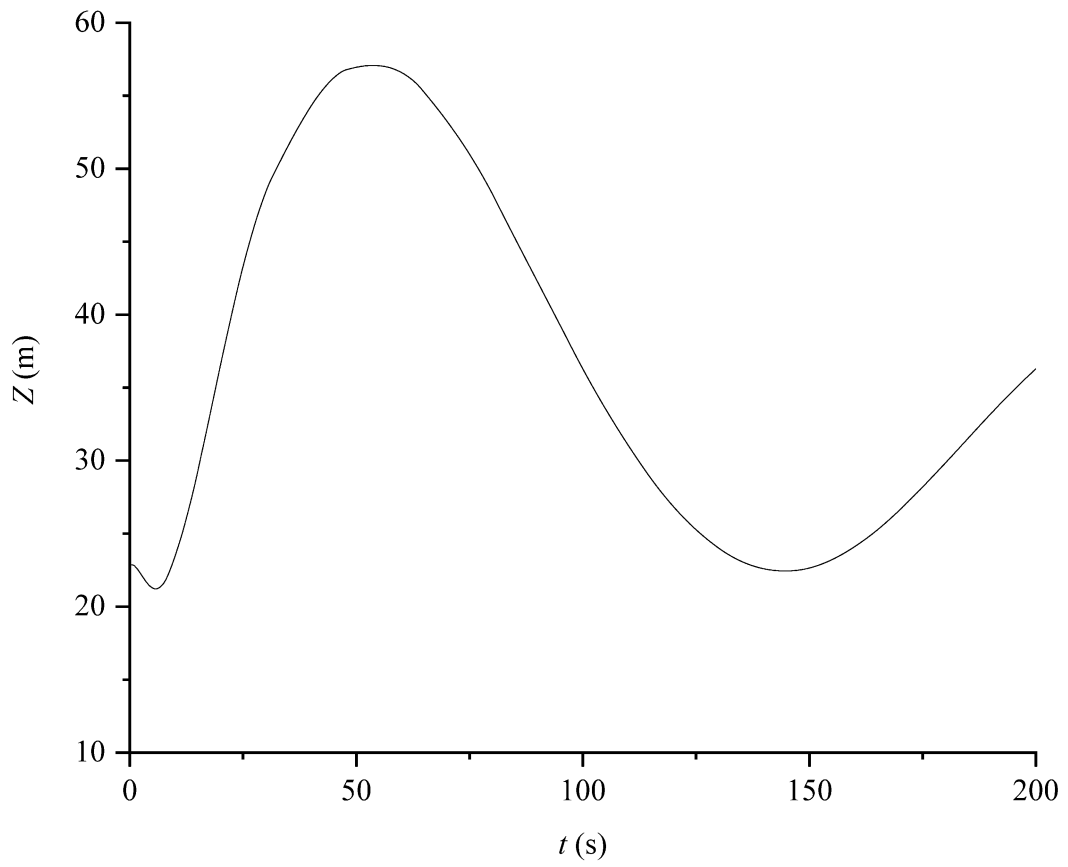


Fig. 31. Scenario n. 3: andamento dei livelli idrici nel pozzo piezometrico