



ACEA ATO 2 SPA



Il Responsabile del Procedimento  
in fase di progettazione  
Ing. Maria Giovanna Sarni

CODICE ATO2- WBS

|      |       |     |          |
|------|-------|-----|----------|
| AAT2 | ICS01 | 000 | A342Q.11 |
|------|-------|-----|----------|

ELABORATO

|          |      |   |     |   |
|----------|------|---|-----|---|
| SUD10120 | PFTE | R | 002 | O |
|----------|------|---|-----|---|

|                 |         |
|-----------------|---------|
| DATA MARZO 2026 | SCALA - |
|-----------------|---------|

INTERCONNESSIONE ACQUEDOTTO  
APPIO-ALESSANDRINO AD ACQUEDOTTO  
DOGANELLA  
LOTTO I

COMUNE DI MONTE COMPATRI  
COMUNE DI SAN CESAREO  
COMUNE DI COLONNA

RELAZIONE IDRAULICA

PROGETTAZIONE:

**INGEGNERIA 2P** & associati s.r.l.  
30027 - San Dona' di Piave (VE)  
Via G.B. Dall'Armi 27/3  
Tel. +39.0421.307700 Mail:  
info@ingegneria2p.it  
Web: www.ingegneria2p.it

Responsabile del progetto: Dott. Ing. Nicola Bisetto  
Aspetti Idraulici: Dott. Ing. Gianna Panizzutti  
Aspetti Ambientali: Dott. Ing. Caterina Masotto  
Aspetti Vincolistici: Dott. For. Michele Marchesin  
Aspetti Elettrici: Dott. Ing. Mattia Betti  
Aspetti Strutturali: Dott. Ing. Giovanni Carretta

Coordinatore per la sicurezza in fase di  
Progettazione  
Dott. Ing. Nicola Bisetto

| AGG. N. | DATA | NOTE | FIRMA |
|---------|------|------|-------|
| 1       |      |      |       |
| 2       |      |      |       |
| 3       |      |      |       |
| 4       |      |      |       |
| 5       |      |      |       |

 Nicola Bisetto  
03.08.2026  
15:22:47  
GMT+02:00

---

**INTERCONNESSIONE ACQUEDOTTO APPIO-ALESSANDRINO AD  
ACQUEDOTTO DOGANELLA  
PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA  
LOTTO I**

**Relazione Idraulica**

---

## INDICE

|       |                                                                                                        |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.    | PREMESSE .....                                                                                         | 3  |
| II.   | LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICA DELL'INTERVENTO.....                                                         | 3  |
| II.   | DESCRIZIONE DELLO STATO DI FATTO .....                                                                 | 3  |
| III.  | OBIETTIVI E ASSUNZIONI PROGETTUALI.....                                                                | 18 |
| a.    | Scenario a breve-medio termine.....                                                                    | 20 |
| b.    | Scenario a lungo termine .....                                                                         | 21 |
| IV.   | DEFINIZIONE DEI TRACCIATI E DIMENSIONAMENTO DELLE CONDOTTE .....                                       | 24 |
| a.    | Descrizione della soluzione progettuale.....                                                           | 24 |
| b.    | Valutazioni idrauliche .....                                                                           | 24 |
| V.    | GLI INTERVENTI DI PROGETTO.....                                                                        | 27 |
| a.    | Materiali.....                                                                                         | 27 |
| VI.   | DIMENSIONAMENTI E VERIFICHE IDRAULICHE.....                                                            | 29 |
| a.    | Determinazione diametri sollevamento .....                                                             | 29 |
| i.    | Caratteristiche della tubazione.....                                                                   | 29 |
| ii.   | Velocità nella tubazione.....                                                                          | 29 |
| iii.  | Criterio economico scelta della tubazione.....                                                         | 31 |
| iv.   | Verifica statica tubazione DN250 .....                                                                 | 33 |
| v.    | Verifica statica tubazione DN600 (LT) .....                                                            | 35 |
| VII.  | Verifica dei transitori idraulici nel sistema idrico Appio - Alessandrino a lungo e breve termine..... | 36 |
| a.    | Introduzione.....                                                                                      | 36 |
| b.    | Metodologia di analisi dei transitori .....                                                            | 39 |
| c.    | A. Transitorio nella condotta Pantano – Santa Chiara .....                                             | 42 |
| d.    | B. Transitorio nella condotta Santa Chiara – Monte Compatri .....                                      | 45 |
| e.    | Conclusioni.....                                                                                       | 48 |
| VIII. | Pattern medi utilizzati .....                                                                          | 49 |

## I. PREMESSE

Il presente documento, costituente la Relazione Idraulica inerente gli interventi di “*Interconnessione acquedotto Appio-Alessandrino ad Acquedotto Doganella*”; il progetto in particolare ha come obiettivo la riduzione dei prelievi idrici presso il campo pozzi Doganella tramite l’interconnessione tra i sistemi idrici dell’acquedotto Appio Alessandrino ed acquedotto Doganella.

Si riportano di seguito gli studi effettuati ed il dimensionamento delle opere, in particolare:

- Dimensionamento delle tubazioni;
- Dimensionamento degli impianti di rilancio da 400 l/s;
- Dimensionamento dei presidi funzionali alla gestione del transitorio idraulico.

## II. LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICA DELL'INTERVENTO

L’intervento di progetto si estende attraverso i Comuni di Monte Compatri, San Cesareo e Colonna in provincia di Roma.

In particolare l’intervento di progetto si sviluppa per circa 10 km a partire dal Campo Pozzi di Pantano Borghese in Comune di Zagarolo (RM) e prevede la posa di due condotte interrate in affiancamento per una lunghezza ciascuna di 4,5 km circa fino a monte dell’attraversamento della SS n.6 “Casilina”, per poi proseguire su due tracciati distinti fino ad arrivare al Serbatoio di Santa Chiara in Comune di Colonna (RM) per un totale di circa 7 km ciascuna; dal Serbatoio di Santa Chiara per 2,3 km circa si prevede la posa di un’unica condotta fino all’interconnessione in Via delle Peditate in Comune di Monte Compatri (RM), con l’adduttrice esistente proveniente dal Campo Pozzi Doganella.

## II. DESCRIZIONE DELLO STATO DI FATTO

La descrizione dello stato di fatto riguarda i due sistemi acquedottistici che si prevede di interconnettere mediante la realizzazione del progetto in oggetto: l’Acquedotto Appio Alessandrino e l’Acquedotto Doganella. Inoltre viene riportata la descrizione anche dell’VIII Sifone dell’Acquedotto Marcio in quanto un’ulteriore contributo all’adduzione verso l’acquedotto Doganella potrebbe essere addotto, ad un orizzonte temporale futuro per il raggiungimento della portata obiettivo di 400 l/s, dall’VIII sifone dell’acquedotto Marcio, una volta terminati gli interventi che interessano quest’ultimo. In attesa che tali interventi siano ultimati, il contributo dall’acquedotto Marcio potrà essere addotto a La Chiesuola sfruttando la rifunionalizzazione dell’attuale nodo di interconnessione “Nodo Alessandrino” che interconnette l’acquedotto Appio Alessandrino proprio all’VIII Sifone dell’acquedotto Marcio, o, in alternativa, tramite futuro nuovo stacco dal nodo in pressione OSA.

#### a) Acquedotto Appio Alessandrino

L'acquedotto Appio Alessandrino convoglia le acque dell'antica sorgente dell'acqua Felice e quelle captate in località Pantano Borghese, Finocchio e Tor Angela, per una portata complessiva di 1.200 l/sec fino al centro di Torre Nova. Le opere di presa a Pantano Borghese sono costituite dai manufatti e dai cunicoli drenanti delle antiche opere di captazione dell'Acquedotto Felice, opportunamente sistemate, e dalle nuove opere di captazione costituite da un complesso di otto pozzi di medio diametro e dalla profondità di 100 metri circa. Tutte le acque vengono confluite nel serbatoio La Chiesuola ed inviate tramite una condotta Ø800-900 mm in acciaio, della lunghezza di 9 km al centro di Tor Angela.



**Figura I - Serbatoio La Chiesuola**



**Figura 2 - Serbatoio La Chiesuola – particolare tubazioni in ingresso e in uscita**

Lungo il percorso vengono immesse nella condotta stessa le acque captate in località Finocchio ove sono stati costruiti tre pozzi con le relative centrali di sollevamento (portata massima fino a 150 l/s).

Le altre acque vengono captate a Torre Angela da quattro gruppi di pozzi, ciascuno dei quali è costituito da un pozzo di grande diametro, da cui possono essere prelevati 200 l/sec e da un pozzo di medio diametro che in caso di fuori servizio delle apparecchiature del pozzo maggiore, garantisce una fornitura di 100 l/sec.

Le acque vengono riunite nel centro di Torre Angela comprendente un piezometro in acciaio di 4,50 m di diametro ed alto 25 m, il cui livello massimo è determinato in base alle massime portate che si possono immettere nell'acquedotto, tenuto conto dell'apporto dell'adduttrice pedemontana sud-orientale (VIII sifone dell'Acqua Marcia), con la quale l'acquedotto è collegato per attuare eventuali funzionamenti di emergenza (questo collegamento tra i due sistemi fu predisposto, ma in realtà non fu mai usato. Oggi l'VIII sifone arriva anch'esso, come anche l'Appio-Alessandrino, al centro idrico di Torre Nova, dove le due acque si miscelano in pre-vasca).

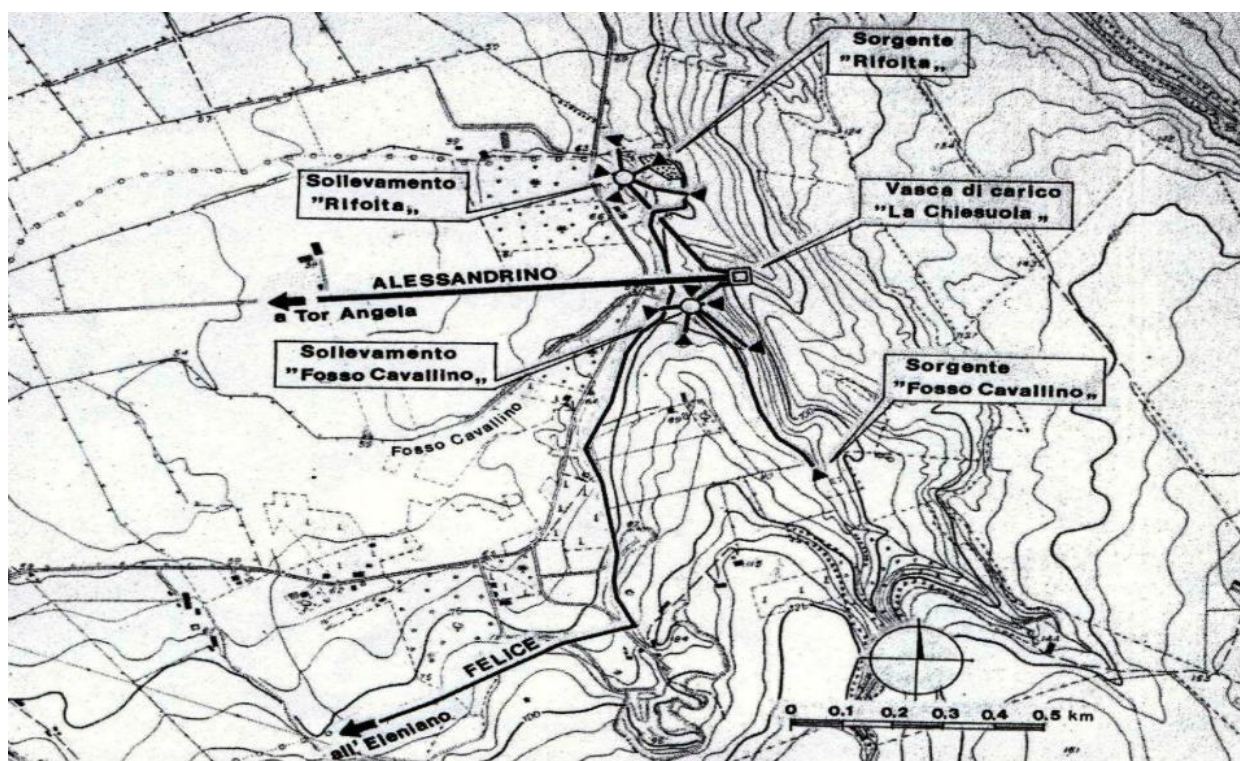


Figura 3 - Planimetria della captazione Pantano Borghese

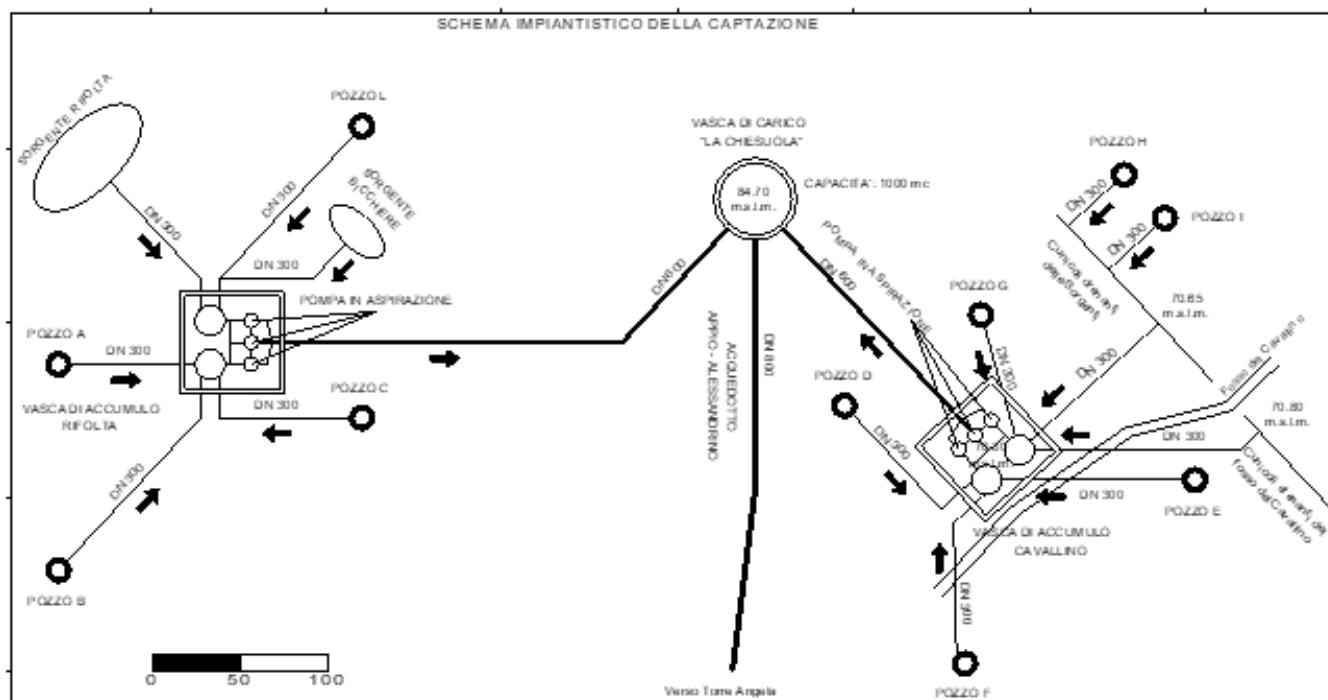


Figura 4 - Schema impiantistico della captazione Pantano Borghese

## b) Acquedotto Doganella

L'acquedotto Doganella, nato intorno all'anno 1935, usufruisce delle acque sollevate in corrispondenza del Campo Pozzi Doganella, a sud della Via Tuscolana, nell'attuale territorio del Comune di Rocca Priora.

L'infrastruttura idrica consta di 9 pozzi, per 16,7 km di dorsale acquedottistica costituita da condotte in acciaio di diametro variabile tra DN700 mm e DN350 mm, che va ad alimentare, attraverso 10 stacchi in pressione, i comuni di Palestrina, San Cesareo, Rocca Priora, Zagarolo, Colonna, Monte Compatri, Monte Porzio Catone e Frascati.

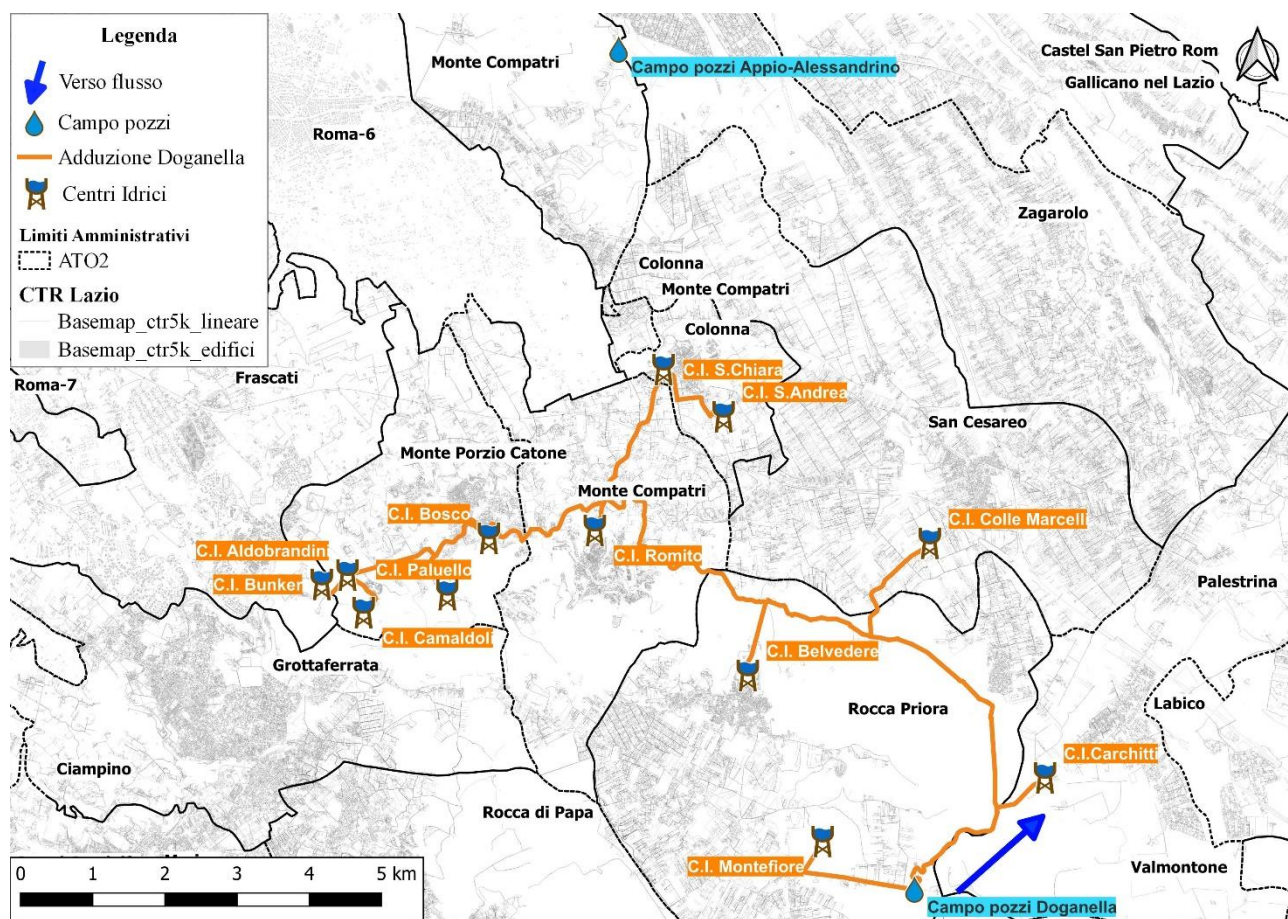


**Figura 5 - Vista planimetrica rete di adduzione acquedotto Doganella**

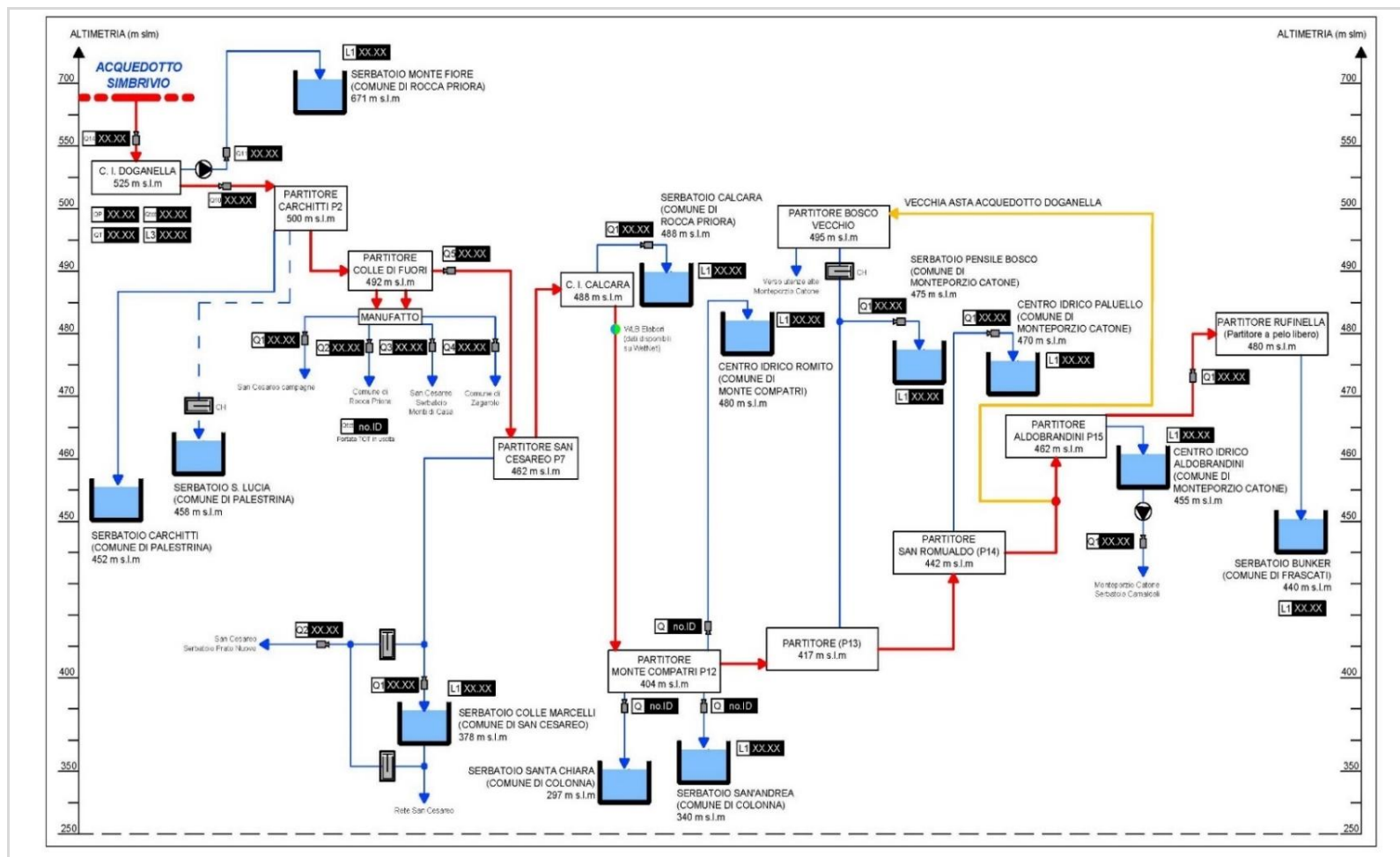


Figura 6 – Schema sinottico acquedotto Doganella

L'alimentazione del serbatoio Doganella, posto ad una quota di 525 m.s.l.m. e con una capacità massima di 4000 m<sup>3</sup>, è garantita da due contributi:

- **Portata prelevata dal campo pozzi (QCP):** rappresenta il prelievo idrico effettuato dai nove pozzi di emungimento collocati nell'unità idrogeologica del distretto vulcanico dei Colli Albani con una portata media annua di 300 l/s - riferimento al periodo di osservazione 2016-2025.

All'interno del Campo Pozzi Doganella (525 m s.l.m.) sono presenti e attivi 9 pozzi, di questi: 1 solleva da un acquifero superiore con un livello dinamico posto a circa 495 m s.l.m., 8 sollevano da un acquifero inferiore con un livello dinamico posto a circa 425 m s.l.m. (Figura 7);



**Figura 7 - Inquadramento territoriale campo pozzi Doganella**

- **Portata derivata dal sistema acquedottistico del Simbrivio (QS):** rappresenta il contributo idrico proveniente da una derivazione dall'Acquedotto del Simbrivio con una portata media annua di circa 60 l/s – riferimento al periodo di osservazione 2016-2025.

Tali contributi costituiscono una **portata totale in uscita dal serbatoio (QOUT)** di circa **360 l/s** medi annui.

Dall'analisi degli andamenti di Figura 8, è possibile osservare nel tempo una graduale diminuzione della portata prelevata dal campo pozzi Doganella, con una portata media annua nel 2025 pari a circa 280 l/s, a fronte di un aumento di portata derivata dal Simbrivio, con una portata media annua nel 2025 di circa 80 l/s. Questo andamento riflette la strategia del Gestore orientata alla riduzione del prelievo dai pozzi, in favore di un maggiore utilizzo delle sorgenti appenniniche maggiormente resilienti, come le sorgenti del Simbrivio.

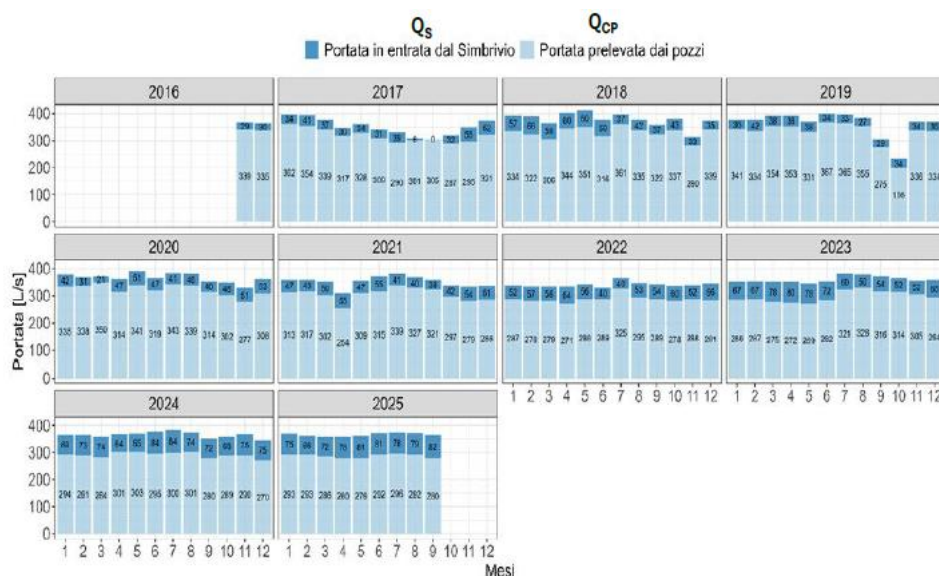


**Figura 8 - Portate medie annue immesse nel serbatoio del campo pozzi Doganella dal 2016 al 2025 (il 2016 ed il 2025 sono anni parziali)**

Il totale attualmente captato dalle perforazioni, e sollevato, è pari a circa 280 l/s e viene inviato ad una vasca di calma a pelo libero, organizzata con tre setti sfioranti, per garantire miscelazione tra le acque prelevate e i giusti tempi di contatto con l'ipoclorito di sodio aggiunto nella vasca stessa, determinante ai fini del corretto abbattimento microbiologico. Nella stessa vasca di raccolta, inoltre, giunge dal nodo Monte Ceraso del Nuovo Acquedotto Simbrivio Castelli (NASC) una portata media pari a 80 l/s: la totalità della risorsa potabile viene immessa nella vasca di carico dell'asta acquedottistica.

Dalla vasca di carico, organizzata in quattro accumuli separati con misuratori di livello individuali, parte l'Acquedotto Doganella vero e proprio con DN700 mm. Tramite un Tee dal collettore in uscita dalle quattro vasche di carico, viene derivata una portata media di circa 18 l/s destinata al serbatoio "Monte Fiore" per l'alimentazione della rete di Rocca Priora mediante impianto di sollevamento, distante idraulicamente 2,5 km dalle vasche; la restante portata, circa 342 l/s nelle ore di maggior consumo, viene immessa in acquedotto facendo così lavorare a compenso le vasche di carico mediante il surplus di acqua potabile nelle ore in cui la richiesta è inferiore alla portata disponibile.

L'acquedotto Doganella, lungo 16,7 km e con funzionamento a gravità, si sviluppa dall'area adiacente a Pratoni del Vivaro fino in prossimità di Frascati, passando per i territori di Rocca Priora, Montecompatri, Monte Porzio Catone, Colonna, Palestrina, Zagarolo e San Cesareo. Le portate vengono distribuite alle varie località attraverso n.10 partitori posizionati lungo l'asta idrica di cui n.9 in pressione e il partitore di arrivo a pelo libero (Figura 9).



**Figura 9 - acquedotto Doganella e partitori**

Seguendo il flusso dell'acqua, dal campo pozzi andando verso valle, si incontrano i seguenti partitori:

- **Partitore P2 Carchitti:** Il partitore Carchitti P2 (504 m s.l.m.) si presenta come una struttura cementizia chiusa immersa in un'area verde, difficilmente raggiungibile con autovetture ordinarie. Prima dell'ingresso al manufatto l'acquedotto passa da un DN700 a un DN500 per poi ritornare a un DN700 una volta uscito dalla struttura. Dal DN500 dell'acquedotto partono due derivazioni distinte in acciaio, entrambe a servizio del comune di Palestrina: una verso località Carchitti (DN100 – 6 l/s), l'altra verso Palestrina zona Olmata (DN200 – 4 l/s). La portata derivata dai due stacchi è di circa 10 l/s totali;
- **Partitore Colle di Fuori P6:** Il partitore Colle di Fuori (498 m s.l.m.), come P2 Carchitti, è immerso in una zona verde, ma più accessibile con autovetture rispetto al manufatto precedente. Prima dell'ingresso al manufatto l'acquedotto passa da un DN700 a un DN500 per poi ritornare a un DN600 una volta uscito dalla struttura. Si compone principalmente di due diverse strutture: una dove si accede al DN500 dell'acquedotto e al suo stacco verso i comuni (in questo manufatto sono tre, uno si dividerà in due successivamente), una seconda dove sono presenti le quattro linee di derivazione con i loro misuratori di portata dedicati. La derivazione idrica dal partitore, circa 77 l/s totali, è effettuata attraverso tubazioni con diametri che variano dal DN100 al DN150 in acciaio, denominate come: San Cesareo campagne, Colle di Fuori, San Cesareo Monti di Casa, Zagarolo;

- **Partitore San Cesareo P7:** Il partitore San Cesareo P7 (463 m s.l.m.) è incluso in una struttura cementizia totalmente interrata accessibile mediante una botola metallica a livello del piano campagna. Prima dell'ingresso al manufatto l'acquedotto passa da un DN600 a un DN500 per poi ritornare a un DN600 una volta uscito dalla struttura. Dal DN500 passante all'interno della struttura, partono due tubazioni del DN150 e DN100 in acciaio, rispettivamente a servizio della distribuzione di San Cesareo e Rocca Priora. Dal partitore vengono derivati circa 35 l/s.
- **Partitore Calcara P10:** Il partitore Calcara (490 m s.l.m.) è inserito in un contesto naturale, facilmente raggiungibile da automezzi ordinari. Prima dell'ingresso al manufatto l'acquedotto passa da un DN600 a un DN500 per poi ritornare a un DN600 una volta uscito dalla struttura. Dal DN500 si dirama un DN150 in acciaio diretto al Serbatoio Calcara a servizio della distribuzione di Rocca Priora. La portata prelevata dall'acquedotto (target di circa 50 l/s) è comandata dal livello del serbatoio stesso che agisce su un'idro-valvola posizionata sul DN150 stesso.
- **Partitore P12 Romito Montecompatri:** Il partitore Montecompatri (497 m s.l.m.) è posto all'interno di un locale seminterrato. Al piano inferiore si trova la tubazione passante dell'Acquedotto che prima dell'ingresso al manufatto l'acquedotto passa da un DN600 a un DN400 per poi ritornare a un DN600 una volta uscito dalla struttura. Dal DN400 dipartono tre stacchi in acciaio del DN100, DN150 e DN250, rispettivamente verso:
  - I. il serbatoio "Santa Chiara", con una portata media annua di 30 l/s, di cui 12 l/s verso la rete del centro storico di Colonna e 18 l/s verso la rete di Monte Compatri denominata "laghetto";
  - II. il serbatoio "Sant'Andrea", a servizio della rete bassa di Colonna con una portata media annua di 8 l/s;
  - III. il serbatoio "Colle Romito Vecchio", a servizio della rete centro di Monte Compatri con una portata media annua di 32 l/s.



**Figura 10 - Interno del partitore P12 Romito Montecompatri**

Al partitore P12 Romito il carico idraulico è di circa 20 m di colonna d'acqua, con carico assoluto di circa 420 m.

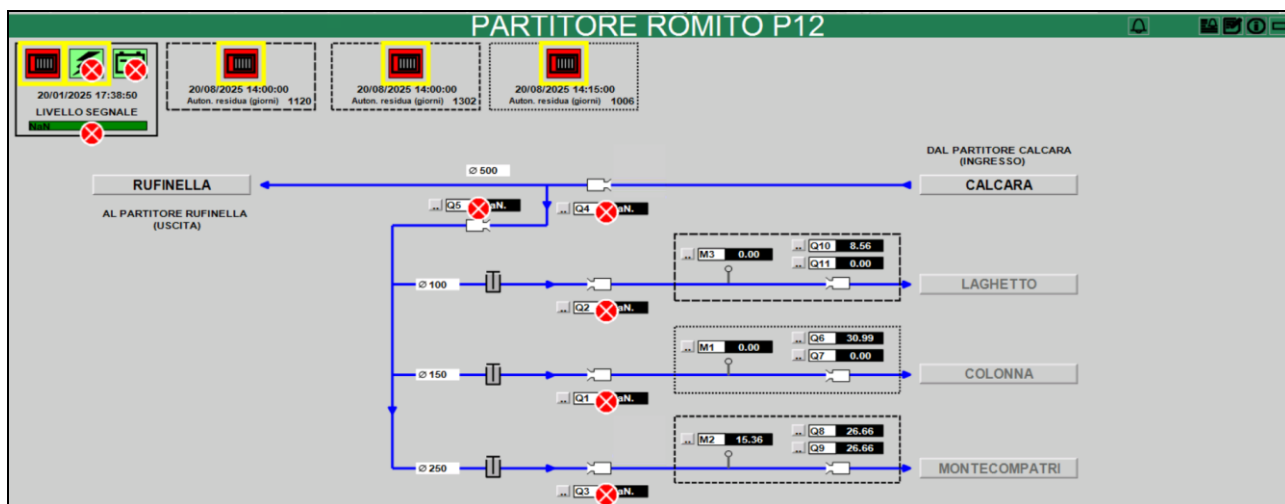


**Figura 11 – Schema Partitore Romito P12 – Acquedotto della Doganella**

**Stacchi verso serbatoio Bosco Vecchio P13, Paluello P14 e Aldobrandini P15:** Posti all'interno di chiusini a terra su strada, sono ubicati gli stacchi dall'acquedotto verso i serbatoi Bosco:

- Pensile e Bosco Vecchio (32 l/s), Paluello (2 l/s) e Aldobrandini (14 l/s), tutti nel comune nel Comune di Monte Porzio Catone. Gli stacchi in totale bevono circa 48 l/s;
- **Partitore Rufinella:** Tra i partitori Paluello e Aldobrandini l'acquedotto passa da un DN500 in acciaio a un DN450 in bonna. Il partitore Rufinella segna l'arrivo finale dell'Acquedotto Doganella e beve circa 54 l/s. Il manufatto è costituito da una struttura nella quale arriva il bonna e un vano dove è posizionato il partitore a pelo libero vero e proprio. Dalla condotta in bonna parte un DN150 in acciaio, poi DN200, che porta l'acqua alla vasca. Da qui un DN200 in acciaio si dirige al serbatoio Bunker a servizio del Comune di Frascati.

Si riportano sinteticamente i contributi dell'acquedotto Doganella ai Comuni alimentati:

**Tabella I - Portata immessa dall'acquedotto Doganella per comune servito (2024)**

| Comune              | Partitori      | Imnesso Doganella 2024<br>[l/s] |
|---------------------|----------------|---------------------------------|
| Palestrina          | P2             | 10                              |
| San Cesareo         | P6, P7 e P10   | 65                              |
| Rocca Priora        | P6 e P10       | 65                              |
| Zagarolo            | P6 e P7        | 52                              |
| Colonna             | P12            | 20                              |
| Monte Compatri      | P12            | 53                              |
| Monte Porzio Catone | P13, P14 e P15 | 41                              |
| Frascati            | Rufinella      | 46                              |
| TOTALE              |                | 352 [l/s]                       |

È fornita di seguito una panoramica sui dati di bilancio consolidati al 2024 e suddivisa per ciascun comune, che ci permette di mettere in luce le criticità legate alla gestione delle reti di distribuzione sottese a quella di adduzione con particolare riferimento alle dispersioni idriche.

**Tabella 2 - Valori dei volumi totali immessi dal campo pozzi Doganella e altre fonti, erogati e persi in rete dei comuni serviti dal sistema di adduzione della Doganella**

| Comune              | Imnesso<br>Doganella<br>2024 [L/s] | Imnesso %<br>Doganella | Imnesso<br>altre fonti<br>2024 [L/s] | Erogato 2024<br>[L/s] | Perdite 2024<br>[%] |
|---------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Palestrina          | 10                                 | 10                     | 93                                   | 38                    | 63                  |
| San Cesareo         | 65                                 | 100                    | -                                    | 24                    | 63                  |
| Rocca Priora        | 65                                 | 91                     | 7                                    | 26                    | 64                  |
| Zagarolo            | 52                                 | 47                     | 59                                   | 34                    | 69                  |
| Colonna             | 20                                 | 100                    | -                                    | 7                     | 64                  |
| Monte Compatri      | 53                                 | 85                     | 9                                    | 22                    | 65                  |
| Monte Porzio Catone | 41                                 | 100                    | -                                    | 21                    | 49                  |
| Frascati            | 46                                 | 37                     | 79                                   | 62                    | 51                  |

La precedente Tabella 2 offre l'opportunità di introdurre alcune considerazioni:

- I. cinque degli otto comuni hanno come fonte esclusiva (o quasi) l'alimentazione dell'acquedotto della Doganella;
- II. mediamente si perde oltre il 60% dei volumi immessi in rete.

Dirette conseguenze delle considerazioni precedenti sono, da un lato, che un'eventuale indisponibilità – parziale o, peggio, totale della risorsa prelevabile dal campo pozzi della Doganella comporterebbe serie difficoltà nel garantire i fabbisogni idrici di ampie aree, rese vulnerabili dalla dipendenza da un unico sistema di approvvigionamento. Dall'altro lato, una significativa riduzione delle perdite idriche consentirebbe di risparmiare importanti volumi di risorsa, limitando il prelievo dall'ambiente.

#### VIII Sifone acquedotto Marcio

Realizzato nel 1964, con il subentro dell'attuale Acea alla Sapam, l'VIII Sifone aveva la funzione di aumentare la portata complessiva del sistema dell'acquedotto Marcio. Iniziato nel 1968 e concluso nel 1970, questo sifone ha una lunghezza complessiva di circa 19 km e ha origine dal manufatto di derivazione presso la località di Casa Valeria. La condotta in acciaio saldato, del diametro di 1.400 mm, dopo aver attraversato la ferrovia di Tivoli e l'Aniene, termina nel manufatto di disconnessione noto come il Calice, da cui si dirama una condotta in cemento armato in leggera contropendenza (in pressione), scavata nel Colle Ripoli. Al termine della galleria è posto un altro manufatto per le apparecchiature d'intercettazione e regolazione della nuova condotta in acciaio saldato, del diametro di 1.000 mm, che parte da tale manufatto e termina nel nodo Osa, presso la via Prenestina, dove avviene la connessione idraulica con i preesistenti sifoni V e VI. Da qui la tubazione, sempre in acciaio saldato, prosegue con un diametro di 1.100 mm e raggiunge l'acquedotto Appio Alessandrino nel nodo Alessandrino, presso la via Casilina.

Dopo aver alimentato il serbatoio di S. Teresa, il sifone termina nel centro idrico di Torrenova, in località Pantano Secco, da cui si dirama la rete di distribuzione per le zone sud-orientali del Comune di Roma. Proprio per tale motivo, questa condotta è nota anche come adduttrice pedemontana sud-orientale.

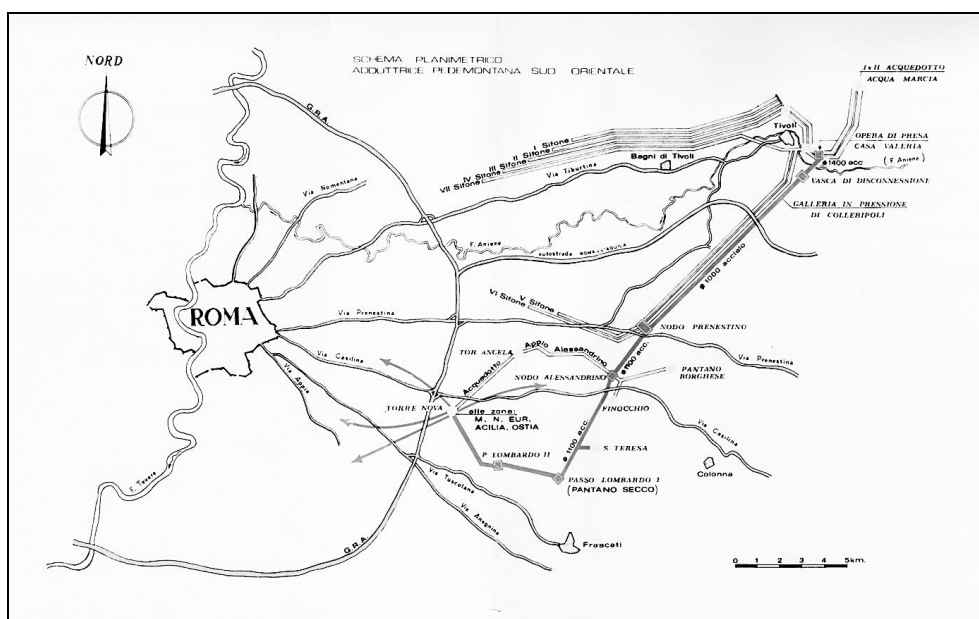


Figura 12 - Schema planimetrico dell'VIII Sifone

Il carico idraulico al nodo OSA varia stagionalmente da 95 m a 125 m di colonna d'acqua. Si ha quindi un carico assoluto variabile da 160 m a 190 m.

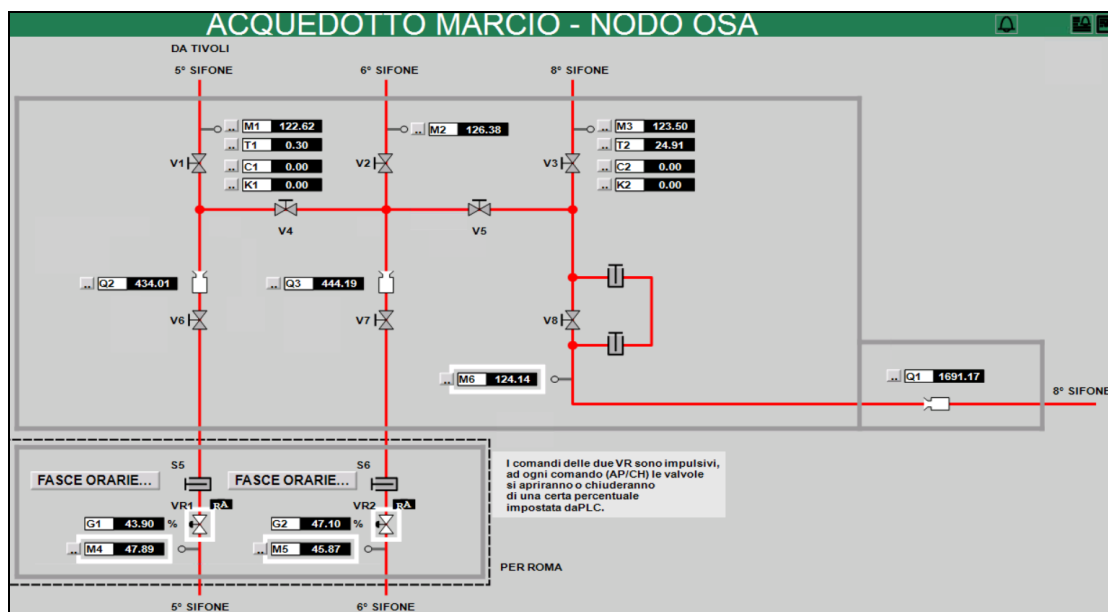


Figura 13 - Schema nodo OSA – VIII Sifone Acquedotto Marcio

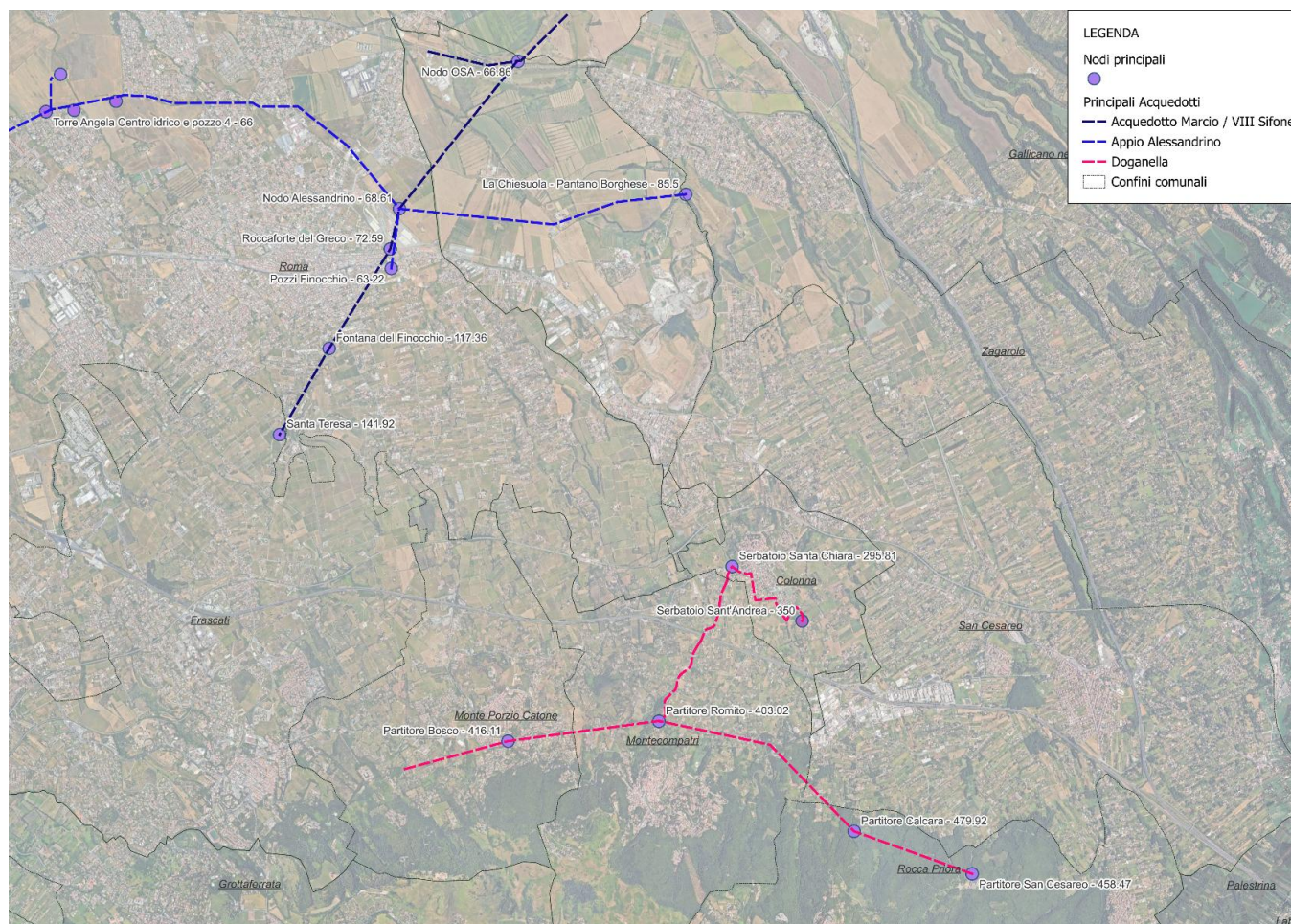


**Figura I4 - Schema generale dello stato di fatto**

### III. OBIETTIVI E ASSUNZIONI PROGETTUALI

L'intervento in oggetto ha come obiettivo la riduzione dei prelievi idrici presso il campo pozzi Doganella tramite l'interconnessione tra i sistemi idrici dell'acquedotto Appio Alessandrino ed acquedotto Doganella.

Tale intervento rientra tra le azioni strategiche di ACEA Ato2 per aumentare la resilienza del sistema idrico, in risposta alla crescente domanda idrica e alla riduzione della disponibilità delle fonti di approvvigionamento.

I prelievi antropici, contestualmente agli effetti del cambiamento climatico, stanno influenzando negativamente la disponibilità idrica degli acquiferi situati nell'area vulcanica dei Colli Albani con ricadute in termini ambientali ed ecologici. In ragione di una futura revisione delle portate emunte dai pozzi Doganella, ACEA Ato2 sta progettando lavori di interconnessione idraulica al fine di poter garantire il servizio idrico dei comuni attualmente serviti dall'acquedotto Doganella tramite l'introduzione di scenari di progressiva riduzione del prelievo dal campo pozzi e apporti da altre fonti idriche coerentemente con gli obiettivi di sostenibilità e ottimizzazione delle risorse idriche.

Il presente studio propone scenari di breve e lungo termine per la progressiva riduzione del prelievo dal campo pozzi Doganella – fino alla sua eventuale conversione in fonte emergenziale e l'azzeramento del prelievo dal Simbrivio, sostituendone i prelievi con quelli provenienti dalle fonti di approvvigionamento dell'acquedotto Appio Alessandrino (Pantano Borghese, Finocchio e Torre Angela), attualmente a servizio del serbatoio di Torrenova, e dagli apporti dell'Acquedotto Marcio (tramite l'VIII sifone o, in alternativa, tramite un nuovo stacco dal nodo in pressione "OSA"), attraverso la realizzazione di nuove infrastrutture idrauliche.

Di seguito si riportano le considerazioni tecniche volte a guidare la progettazione di un nuovo sistema di adduzione che prevede il prelievo di risorsa idrica presso fonti di approvvigionamento dell'acquedotto Appio Alessandrino e la costruzione di un sistema di adduzione volto ad alimentare i fabbisogni (in uno scenario a breve termine – Lotto 1) del comune di Colonna e parzialmente di Monte Compatri, e successivamente (nello scenario a lungo termine – Lotto 2) l'estensione della condotta di adduzione fino all'interconnessione con l'adduttrice esistente per prevedere la totale copertura dei fabbisogni attualmente soddisfatti dal campo pozzi della Doganella.

L'apporto proveniente dalle fonti dell'Appio Alessandrino (pozzi di Pantano Borghese, Finocchio e Torre Angela) verrà conferito, con contributi sempre crescenti, presso il serbatoio la Chiesuola nell'area di Pantano Borghese e tramite un sistema di sollevamento verrà addotto in una prima fase nel serbatoio di Santa Chiara nel comune di Colonna (oggi alimentato dall'acquedotto Doganella) ed in una seconda fase direttamente nell'acquedotto Doganella all'interconnessione con l'adduttrice esistente in Via delle Pedicate nel comune di Monte Compatri, che alimenterà i partitori ed i serbatoi sia a valle che a monte sull'asta della Doganella.

Una portata di progetto massima di circa 400 l/s consentirebbe sia l'azzeramento dei prelievi dal campo pozzi Doganella (che a tutti gli effetti diventerebbe una fonte emergenziale) e la drastica riduzione del contributo dell'acquedotto Simbrivio (NASC) al serbatoio Doganella (circa 80 l/s) che sarebbero ridistribuiti sui comuni dell'asta Simbrivio, soggetti a carenza idrica nei periodi estivi.

Un ulteriore contributo all'adduzione verso l'acquedotto Doganella potrebbe essere addotto, ad un orizzonte temporale futuro per il raggiungimento della portata obiettivo di 400 l/s, dall'VIII sifone dell'acquedotto Marcio, una volta terminati gli interventi che interessano quest'ultimo. In attesa che tali interventi siano ultimati, il contributo dall'acquedotto Marcio potrà essere addotto a La Chiesuola sfruttando la rifunionalizzazione dell'attuale nodo di interconnessione "Nodo Alessandrino" che interconnette l'acquedotto Appio Alessandrino proprio all'VIII Sifone dell'acquedotto Marcio (Figura 14), o, in alternativa, tramite futuro nuovo stacco dal nodo in pressione OSA.

L'intervento prevede la progettazione e la realizzazione delle opere di interconnessione tra i pozzi dell'Appio-Alessandrino (pozzi Pantano Borghese, Finocchio e Torre Angela) e la rete di adduzione della Doganella in due distinte fasi temporali:

- **Scenario a breve-medio termine**, sollevamento di una portata di circa 40 l/s medi dal serbatoio la Chiesuola (nell'area di Pantano Borghese, sfruttando parzialmente le fonti di approvvigionamento dell'acquedotto Appio Alessandrino), presso il serbatoio Santa Chiara (nel comune di Colonna). Dal serbatoio si potrà soddisfare il fabbisogno idropotabile di Colonna e dei distretti Santa Chiara e Laghetto del comune di Montecompatri oggi alimentati dall'acquedotto Doganella.
- **Scenario a lungo termine**: sfruttamento delle fonti di approvvigionamento dell'acquedotto Appio Alessandrino e del surplus di portata sull'VIII sifone dell'acquedotto Marcio resa disponibile dagli interventi di messa in sicurezza dell'acquedotto Marcio e del raddoppio dell'VIII sifone stesso, oltre che dall'eventuale ulteriore interconnessione OSA – Pantano Borghese, per ridurre al minimo la portata emunta dal campo pozzi Doganella, adducendo:
  - a) in prima fase una portata complessiva di circa 170 l/s fino all'acquedotto Doganella presso il nuovo nodo di interconnessione di Via delle Pedicate, nel comune di Monte Compatri, soddisfacendo così i fabbisogni idropotabili dei comuni di Colonna, Monte Compatri, Monteporzio Cartone e Frascati;
  - b) in una seconda fase una portata complessiva di circa 400 l/s verso il nodo di interconnessione di Via delle Pedicate, nel comune di Monte Compatri, garantendo l'azzeramento dei prelievi da campo pozzi e l'alimentazione di tutti i comuni oggi serviti da tali prelievi sfruttando l'acquedotto esistente.

Lo schema scelto, illustrato in Figura 15, è stato articolato in uno scenario di breve termine e uno scenario di lungo termine.

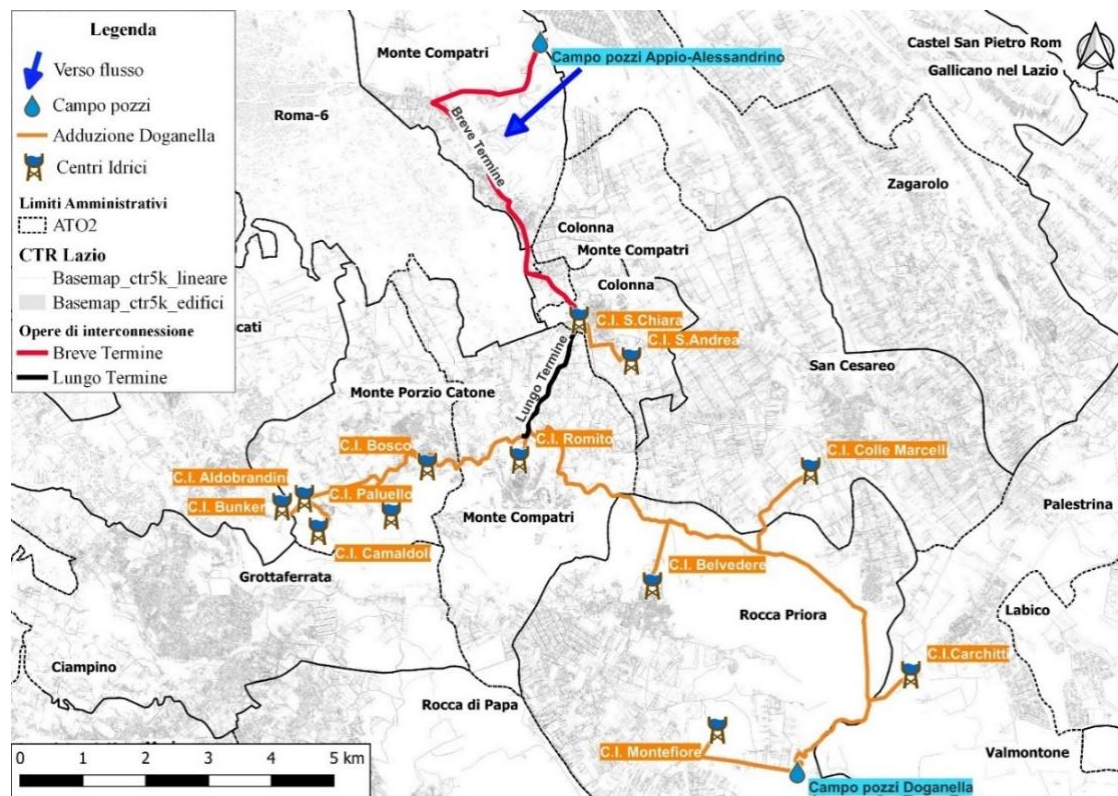


**Figura I5 - Vista planimetrica della soluzione proposta**

#### **a. Scenario a breve-medio termine**

Lo scenario di breve termine è finalizzato a ridurre in modo tempestivo i prelievi dal campo pozzi Doganella, garantendo al contempo la continuità del servizio idrico nei comuni attualmente serviti.

Questo prevede lo sfruttamento parziale delle fonti di approvvigionamento dell'acquedotto Appio Alessandrino per alleggerire il prelievo presso il campo pozzi Doganella mediante interconnessione con il serbatoio Santa Chiara, nel comune di Colonna, per una portata di circa 40 l/s medi, destinati all'alimentazione del Comune di Colonna e, in parte, della rete di Monte Compatri. da considerarsi relativa al solo prelievo dal campo pozzi di Pantano Borghese.

Per raggiungere l'obiettivo si prevede l'installazione di un impianto di sollevamento di breve termine presso il centro idrico La Chiesuola, nei locali oggi esistenti del Pozzo Cavallino, che sia in grado di sollevare una portata di 40 l/s e con una prevalenza valutata sulla base delle condotte che si prevede di installare come meglio verrà descritto successivamente.

Riassumendo l'intervento di breve termine consta di:

- Realizzazione di un nuovo impianto di sollevamento presso i locali civili esistenti del Pozzo Cavallino;
- prevede la posa di due condotte interrate in affiancamento per una lunghezza ciascuna di 4,5 km circa fino a monte dell'attraversamento della SS n.6 "Casilina", per poi proseguire su due tracciati distinti

fino ad arrivare al Serbatoio di Santa Chiara in Comune di Colonna (RM) per un totale di circa 7 km ciascuna;

- Integrazione dell'impianto di sollevamento presso il serbatoio Santa Chiara per garantire la portata a copertura del serbatoio Sant'Andrea (portata 8 l/s, prevalenza 40 m).

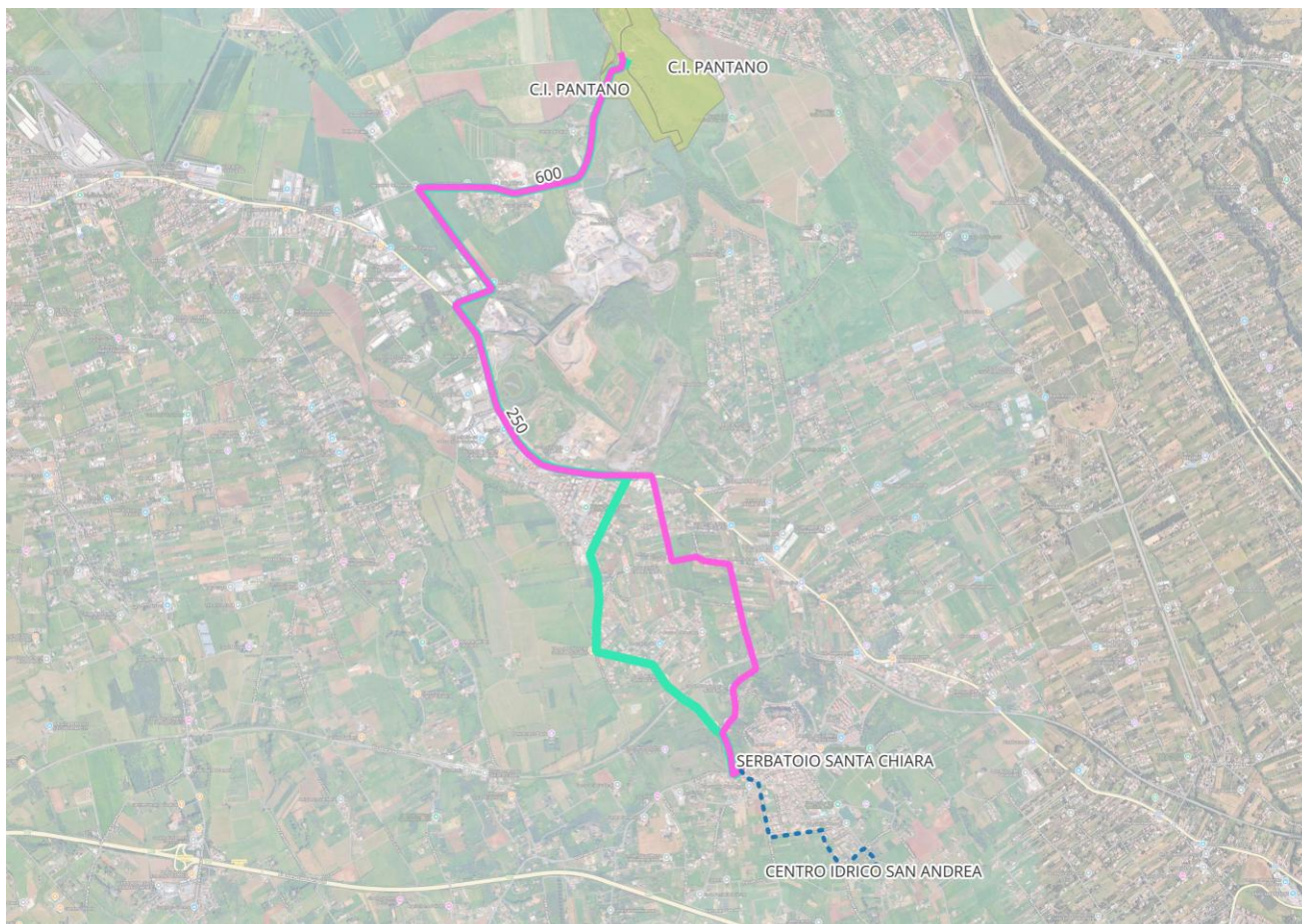


**Figura I 6 - Tracciato Pantano Borghese – Santa Chiara – scenario a breve termine – in azzurro il tracciato della condotta DN250 mm in magenta quello del DN600 mm**

#### **b. Scenario a lungo termine**

L'obiettivo progettuale consiste nell'adduzione di portata dal serbatoio Santa Chiara, che dovrà essere oggetto di lavori di potenziamento in termini di capacità di accumulo, fino al serbatoio Doganella, attraverso un nuovo tracciato che preveda la posa di una condotta fino all'interconnessione con l'adduttrice esistente nel punto di interconnessione di Via delle Peditate in Comune di Monte Compatri. Da questo punto, il flusso sarà convogliato in parte verso il serbatoio Doganella sfruttando l'attuale condotta esistente in acciaio con diametri variabili dal DN400 al DN700, utilizzata in senso inverso rispetto alla configurazione attuale, ed in parte verso i comuni idraulicamente a valle del partitore PI2 – Romito in Comune di Monte Compatri.

Questo prevede lo sfruttamento integrale delle fonti di approvvigionamento dell'acquedotto Appio Alessandrino (Pantano Borghese, Finocchio e Torre Angela) e del surplus di portata sull'VIII sifone dell'acquedotto Marcio, resa disponibile dagli interventi di messa in sicurezza dell'acquedotto Marcio e del raddoppio dell'VIII sifone stesso, oltre che dall'eventuale ulteriore interconnessione OSA – Pantano Borghese, per ridurre al minimo la portata emunta dal campo pozzi Doganella, adducendo:

a) in prima fase una portata complessiva di circa 170 l/s (fino ad un massimo di 200 l/s) fino all'acquedotto Doganella presso il nuovo nodo di interconnessione, nel comune di Monte Compatri, soddisfacendo così i fabbisogni idropotabili dei comuni di Colonna, Monte Compatri, Monteporzio Catone e Frascati; affinché questo sia possibile si rendono necessari i seguenti interventi:

- Realizzazione di un nuovo impianto di sollevamento nell'area del Campo Pozzi di Pantano Borghese ad una portata di 170 l/s;
- Posa di una condotta dal serbatoio Santa Chiara al nodo di interconnessione di Via delle Pedicate, per una lunghezza complessiva di 2,3 km su via Monte Compatri e Via delle Pedicate;
- Potenziamento del serbatoio Santa Chiara (volume attuale 250 m<sup>3</sup>; volume complessivo atteso di almeno di 4.000 m<sup>3</sup>). Attualmente, il serbatoio svolge esclusivamente la funzione di disconnessione idraulica tra il sistema di adduzione della Doganella e la rete di distribuzione del Comune di Colonna. Gli interventi di rifunzionalizzazione e aggiornamento del sistema di adduzione della Doganella dovranno prevedere un nuovo ruolo per il serbatoio di Santa Chiara, valorizzandone la funzione strategica. In particolare, per garantire la continuità del servizio e la completa copertura del fabbisogno idrico dei comuni attualmente alimentati dal tratto di adduzione della Doganella, è necessario che il volume abbia una capacità tale da immettere in rete una portata massima di 400 l/s (360 l/s in direzione del serbatoio Doganella e 40 l/s verso il comune di Colonna e una parte di rete di Monte Compatri). Considerando anche gli aspetti legati alla sicurezza il nuovo serbatoio avrà anche la funzione di accumulo, compensazione e riserva, garantendo la continuità del servizio anche in caso di interruzioni o carenze nell'alimentazione.
- Realizzazione di un impianto di sollevamento che da Santa Chiara sollevi fino al nuovo nodo di interconnessione 170 l/s (sino alla portata massima di 360 l/s nello scenario definitivo) con una prevalenza tale da raggiungere in una prima fase il nodo stesso ed i due serbatoi più alti della rete a valle (Romito di Montecompatri e Bosco di Monteporzio Catone) ed in una seconda fase il serbatoio della Doganella.

b) In una seconda fase una portata complessiva di circa 360 l/s fino all'acquedotto Doganella presso il nodo di interconnessione, garantendo il potenziale azzeramento dei prelievi dal campo pozzi

Doganella e del contributo del NASC e l'alimentazione di tutti i comuni oggi serviti dall'acquedotto Doganella; affinché questo sia possibile si rendono necessari i seguenti interventi:

- Funzionamento del nuovo impianto di sollevamento presso l'area del campo pozzi di Pantano Borghese ad una portata di 400 l/s;
- Funzionamento dell'impianto di sollevamento al serbatoio Santa Chiara ad una portata di 360 l/s.

Inoltre verranno valutate le ripercussioni che il nuovo regime di pressioni imposto dal sollevamento presso il serbatoio Santa Chiara imporrà nell'acquedotto Doganella esistente e nei relativi partitori e l'introduzione nel sistema di idonei sistemi di controllo delle pressioni (dissipatori) ove necessario nonché l'eventualità di adeguamento dei nodi più critici.

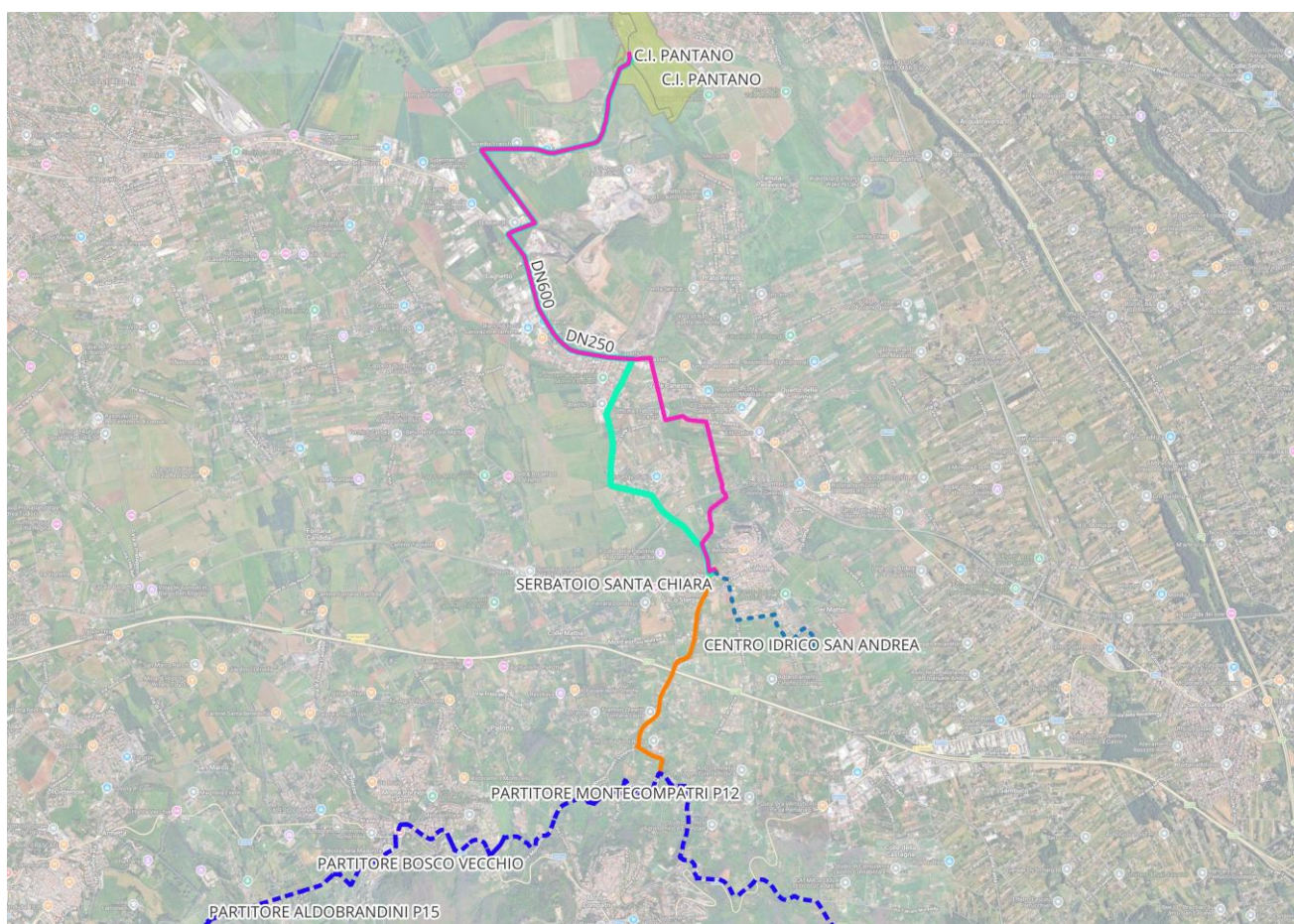


**Figura 17 - Tracciato Santa Chiara – Via delle Pedicate, scenario a lungo termine - in azzurro il tracciato della condotta DN250 mm, in magenta quello del DN600 mm e in arancione il tracciato DN600 mm di lungo termine.**

## IV. DEFINIZIONE DEI TRACCIATI E DIMENSIONAMENTO DELLE CONDOTTE

### a. Descrizione della soluzione progettuale

La soluzione prevede la posa di due condotte interrate in ghisa sferoidale, ma con diverso diametro, una di 250 mm e l'altra 600 mm in affiancamento per una lunghezza ciascuna di 4,5 km circa fino a monte dell'attraversamento della SS n.6 "Casilina", per poi proseguire su due tracciati distinti fino ad arrivare al Serbatoio di Santa Chiara in Comune di Colonna (RM) per un totale di circa 7 km ciascuna.

In questo caso la condotta di minor diametro verrebbe utilizzata per lo scenario a breve termine, mentre quella di diametro maggiore per quello a lungo termine. Le condotte consentono una portata ottimale per la fase a breve termine nella condotta di diametro 250 mm; maggiore efficienza energetica sia nel breve che nel lungo termine; possibilità di riutilizzare la condotta minore come alimentazione delle frazioni di Monte Compatri nel lungo periodo, pur dovendo agire sulle modalità di allaccio delle utenze.

### b. Valutazioni idrauliche

Le valutazioni idrauliche condotte nell'ambito della presente Relazione Idraulica sono finalizzate alla definizione della configurazione più efficiente del nuovo sistema di adduzione tra l'acquedotto Appio-Alessandrino e l'acquedotto Doganella, verificandone la compatibilità sia con lo scenario di breve termine (portata  $\approx 40$  l/s), sia con gli scenari di lungo termine (portate fino a 170–200 l/s e, successivamente, fino a 360–400 l/s).

L'analisi è stata svolta considerando i seguenti elementi fondamentali:

- **caratteristiche geometriche ed altimetriche del tracciato**, con sviluppo planimetrico di circa 10 km e dislivelli complessivi significativi tra La Chiesuola, Santa Chiara e il nodo di Via delle Pedicate;
- **carichi disponibili presso le fonti e carichi richiesti presso i punti di consegna**, valutati in relazione alle configurazioni di esercizio previste;
- **perdite di carico lineari e localizzate**, calcolate per ciascuna alternativa progettuale e per ciascuna fase di esercizio;
- **compatibilità delle pressioni con le opere esistenti dell'acquedotto Doganella**, incluse le verifiche sul comportamento dei partitori e dei serbatoi a valle;
- **verifica delle velocità di moto**, con particolare attenzione al mantenimento dei requisiti igienico-sanitari nelle fasi di bassa portata (40 l/s);
- **valutazione dell'efficienza energetica** dei gruppi di sollevamento necessari negli scenari futuri.

### b.1 Criteri generali di valutazione idraulica

La progettazione del nuovo sistema di adduzione deve garantire:

1. **Continuità di esercizio** in tutte le condizioni di portata previste;
2. **Adeguatezza flessibilità** per consentire la transizione dalla fase di breve termine agli scenari di lungo termine;
3. **Stabilità delle pressioni**, sia nella nuova condotta sia nell'asta dell'acquedotto Doganella;
4. **Riduzione delle dissipazioni di energia**, compatibilmente con le lunghezze e le pendenze del tracciato;
5. **Rispetto dei vincoli igienico-sanitari**, assicurando una velocità minima di scorrimento pari a circa **0,5 m/s** nelle condotte.

Le verifiche sono state effettuate sotto le seguenti ipotesi:

- il punto di consegna della risorsa in fase breve è il **Serbatoio S. Chiara**;
- il punto di consegna nella fase lunga è il **nodo di interconnessione di Via delle Peditate**, con successiva immissione nel sistema Doganella esistente;
- la prevalenza di sollevamento presso La Chiesuola e Santa Chiara è dimensionata in modo da superare le quote topografiche più critiche del percorso, tenendo conto delle perdite di carico delle alternative analizzate;
- il regime di funzionamento dell'acquedotto Doganella subirà variazioni significative per effetto dell'inversione dei flussi nella tratta a monte del PI2 Romito, che richiederanno l'introduzione di sistemi di controllo pressorio (valvole dissipatrici o PRV) ove necessario.

## **b.2 Analisi idraulica della soluzione progettuale**

- In **fase breve**, la condotta DN 250 mm garantisce una velocità di esercizio adeguata ( $\approx 0,8\text{--}1,0$  m/s) con portata 40 l/s, assicurando condizioni igienico-sanitarie ottimali.
- La condotta DN 600 mm, pur inutilizzata in fase breve, risulta idonea a trasportare portate fino a 200 l/s con perdite di carico molto contenute.
- In **fase finale**, con portate fino a 360–400 l/s, la condotta DN 600 mm può essere esercitata anche con pressioni elevate derivanti dal sollevamento da Santa Chiara, mantenendo velocità comprese tra 1,2 e 1,6 m/s e dissipazioni stabili.
- La diversificazione dei diametri consente **migliore modulazione idraulica**, riduce le potenze di sollevamento richieste in fase breve e migliora l'efficienza energetica.

**Conclusioni idrauliche:** la soluzione assicura **maggior resilienza e costi energetici inferiori**.

## **b.3 Valutazione delle pressioni sul sistema esistente Doganella**

L'immissione nel nodo di Via delle Pedicate comporta:

- **inversione del flusso nella tratta P12 → Doganella**, con possibile aumento dei carichi idraulici nei partitori P12, P13, P14, P15 e Rufinella;
- possibilità di **superamento dei carichi ammissibili** nei nodi più elevati (P12 Montescompatri e Bosco Monteporzio), richiedendo:
  - valvole di dissipazione,
  - regolazione della portata in ingresso,
  - eventuale riprofilatura dei livelli idrici dei serbatoi.
- Necessità di verificare le **tubazioni storiche in acciaio/bonna**, oggi esercite con carichi inferiori.

Le simulazioni indicano che:

- nella fase 170–200 l/s i livelli di pressione restano entro limiti accettabili con corretta regolazione;
- nella fase 360–400 l/s è **obbligatoria la presenza di dissipation control** a monte e presso i partitori più sensibili.

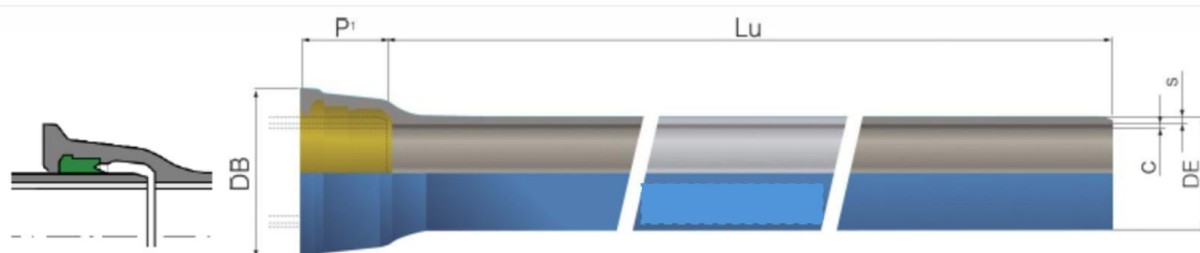
## V. GLI INTERVENTI DI PROGETTO

### a. Materiali

Per la realizzazione delle nuove condotte adduttrici si prevede l'impiego di tubazioni in ghisa sferoidale prodotti in stabilimento europeo certificato a norma EN ISO 9001:2000 e conformi alla norma EN 545:2010–ISO 2531:2009. Classe di spessore C40.

La lunghezza utile è pari a 6 metri e relative tolleranze conformi alla norma EN 545:2010. I tubi hanno un'estremità a bicchiere e sono rivestiti – esternamente con una protezione rinforzata di lega fusa di zinco e alluminio, con una composizione pari a 85%Zn–15%Al e arricchita in rame(Cu) con una massa totale minima pari a 400 g/m<sup>2</sup>, con successivo strato di protezione di natura acrilica AQUACOAT di spessore minimo 80µm di colore blu conformi alla norma EN 545:2010–ISO 8179. Il rivestimento è idoneo per la maggior parte dei suoli, come definito nell'allegato D.2.2 della norma EN545:2010 – internamente con malta cementizia d'altoforno applicata per centrifugazione secondo a norma EN 545:2010–ISO 4179 UNI-EN 197. Per trasportare acqua potabile il rivestimento è conforme alla Direttiva 98/83/CE. Sistema di giunzione a mezzo di anello di gomma, giunto elastico automatico di tipo “standard” conforme alla norma UNI 9163 con guarnizione conforme alla norma EN 681-I, consentono deviazioni angolari in funzione del DN.  $\leq \text{DN } 300 = 5^\circ$  –  $\text{DN } 350 \div 600 = 4^\circ$

I pezzi speciali, ricavati da tubi già opportunamente collaudati in officina, devono corrispondere alle sopracitate prescrizioni, ove applicabili, e devono essere dimensionati con uno spessore maggiorato di almeno il 15% rispetto alle tubazioni correnti, per tener conto delle maggiori sollecitazioni a cui sono sottoposte.



| DN   | Lu      | Dimensioni |                  |                    | Spessore Nominale |     | Massa |             |             | Dev. Ang. | Classe |
|------|---------|------------|------------------|--------------------|-------------------|-----|-------|-------------|-------------|-----------|--------|
|      |         | DE         | DB <sub>AJ</sub> | P <sub>1, AJ</sub> | S                 | C   | Kg/m  | Kg/pz. 5,5m | Kg/pz. 6,0m |           |        |
| mm   | m       | mm         | mm               | mm                 | mm                | mm  |       |             |             |           |        |
| 80   | 5,5/6,0 | 98         | 168              | 80                 | 4,9               | 4,0 | 11,9  | 65,5        | 71,4        | 5°        | C50    |
| 100  | 5,5/6,0 | 118        | 189              | 82                 | 4,9               | 4,0 | 13,9  | 76,4        | 83,3        | 5°        | C50    |
| 125  | 5,5/6,0 | 144        | 216              | 85                 | 4,9               | 4,0 | 17,4  | 95,8        | 104,5       | 5°        | C50    |
| 150  | 5,5/6,0 | 170        | 243              | 88                 | 5,0               | 4,0 | 20,9  | 115,0       | 125,4       | 5°        | C50    |
| 200  | 5,5/6,0 | 222        | 296              | 94                 | 4,6               | 4,0 | 28,6  | 157,0       | 171,3       | 5°        | C40    |
| 250  | 5,5/6,0 | 274        | 353              | 94                 | 5,5               | 4,0 | 40,3  | 221,7       | 241,8       | 5°        | C40    |
| 300  | 5,5/6,0 | 326        | 410              | 95                 | 6,2               | 4,0 | 53,3  | 293,3       | 320,0       | 5°        | C40    |
| 350  | 5,5/6,0 | 378        | 465              | 98                 | 6,4               | 5,0 | 68,1  | 374,8       | 408,8       | 4°        | C30    |
| 400  | 5,5/6,0 | 429        | 517              | 100                | 6,5               | 5,0 | 79,7  | 438,6       | 478,4       | 4°        | C30    |
| 450  | 5,5/6,0 | 480        | 575              | 103                | 6,9               | 5,0 | 94,1  | 517,5       | 564,5       | 3°        | C30    |
| 500  | 5,5/6,0 | 532        | 630              | 105                | 7,4               | 5,0 | 111,8 | 614,9       | 670,8       | 3°        | C30    |
| 600  | 5,5/6,0 | 635        | 739              | 110                | 8,6               | 5,0 | 151,5 | 833,3       | 909,1       | 3°        | C30    |
| 700  | 5,5/6,0 | 738        | 863              | 135                | 8,8               | 6,0 | 184,7 | 1015,7      | 1108,1      | 3°        | C25    |
| 800  | 5,5/6,0 | 842        | 974              | 135                | 9,6               | 6,0 | 227,6 | 1251,7      | 1365,5      | 3°        | C25    |
| 900  | 5,5/6,0 | 945        | 1082             | 135                | 10,6              | 6,0 | 278,7 | 1533,0      | 1672,4      | 1,5°      | C25    |
| 1000 | 5,5/6,0 | 1048       | 1191             | 150                | 11,6              | 6,0 | 334,8 | 1841,2      | 2008,6      | 1,5°      | C25    |
| 1200 | 5,5/6,0 | 1255       | -                | -                  | 13,6              | 6,0 | 474,6 | 2610,1      | 2847,4      | 1,5°      | C25    |
| 1400 | 5,5/6,0 | 1462       | -                | -                  | 15,6              | 9,0 | 653,4 | 3593,9      | 3920,6      | 1,5°      | C25    |
| 1600 | 5,5/6,0 | 1668       | -                | -                  | 17,7              | 9,0 | 830,2 | 4566,1      | 4981,2      | 1,5°      | C25    |

Il rivestimento esterno delle tubazioni dovrà essere in polietilene triplo strato estruso mentre il rivestimento interno dovrà essere in resina epossidica certificato per acque destinate al consumo umano. A causa della presenza in parallelismo delle condotte Terna di prossima realizzazione, solo per questi tratti, è prevista l'adozione di un ulteriore rivestimento esterno consistente nell'avvolgimento della tubazione mediante nastratura in PE; inoltre la copertura del giunto, che rimane parzialmente scoperto dalla nastratura, è realizzata mediante l'applicazione di una guaina in EPDM (non termorestringente). Tale guaina viene installata manualmente, senza l'ausilio di attrezzature, garantendo la continuità del rivestimento esterno.

Il sistema di rivestimento così configurato risulta idoneo per la posa in terreni caratterizzati dalla presenza di correnti vaganti, come nel caso di progetto.

## VI. DIMENSIONAMENTI E VERIFICHE IDRAULICHE

### a. Determinazione diametri sollevamento

#### i. Caratteristiche della tubazione

Come detto si è scelto di utilizzare, per i sollevamenti in argomento, condotte in ghisa sferoidale con classe di resistenza C40, ciò perché le tubazioni in tale materiale sono quelle che meglio rispondono alle esigenze costruttive, economiche e di durata di un impianto di adduzione. Si utilizzeranno delle giunzioni a bicchiere sferico con saldatura, per permettere variazioni angolari nella posa delle canne fino a 5°.

| DN<br>[mm] | Dest<br>[mm] | Spessore<br>[mm] | Dint<br>[mm] | Costo<br>[€/ml] |
|------------|--------------|------------------|--------------|-----------------|
| 200        | 222          | 4.6              | 212.8        | 176.3           |
| 250        | 274          | 5.5              | 263          | 219.7           |
| 300        | 326          | 6.2              | 313.6        | 283.8           |
| 350        | 378          | 6.4              | 365.2        | 514.9           |
| 400        | 429          | 6.5              | 416          | 586.6           |
| 450        | 480          | 6.9              | 466.2        | 657.3           |
| 500        | 532          | 7.4              | 517.2        | 729.3           |
| 600        | 635          | 8.6              | 617.8        | 871.1           |
| 700        | 738          | 8.8              | 720.4        | 1015.8          |
| 800        | 842          | 9.6              | 822.8        | 1160.1          |
| 900        | 945          | 10.6             | 923.8        | 1302.6          |
| 1000       | 1191         | 11.6             | 1167.8       | 1646.6          |

Tabella 1: diametri commerciali, spessori e prezzi a metro lineare di tubi in ghisa sferoidale

Per la valutazione delle perdite di carico  $J$  si utilizza la formula di Hazen-Williams.

$$J\left(\frac{m}{m}\right) = 10.675 \frac{Q^{1.852} \left(\frac{m^3}{s}\right)}{C^{1.852} D^{4.8704} (m)}$$

Dove si è considerato per il coefficiente  $C=130$  valido per tubazioni di ghisa sferoidale.

#### ii. Velocità nella tubazione

Le velocità medie nei tratti a sollevamento è prassi tecnica corrente che devono rispettare due limiti: non troppo bassa per evitare un ristagno nelle tubazioni che provoca un riscaldamento (soprattutto nei mesi estivi), generando bolle d'aria e facendo peggiorare in generale le caratteristiche organolettiche dell'acqua;

non troppo elevata, allo scopo di preservare le condotte da eccessivi fenomeni di vibrazione e di limitare gli effetti del colpo d'ariete.

Nei tratti elevatori l'intervallo di velocità si restringe a:

$$0.50 \text{ m/s} < v < 1.50 \text{ m/s}$$

Da queste considerazioni si possono valutare i corrispondenti range dei diametri interni utilizzabili per l'applicazione del criterio economico in ciascun impianto.

$$Q = \sigma \times v = \frac{\pi \times D^2}{4} v \quad \Rightarrow \quad D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times v}}$$

Impianto elevatorio da campo Pozzi Pantano a Serbatoio Santa Chiara, breve termine (BT)

La portata da addurre è pari a  $Q_m = 40 \frac{l}{s} = 0.040 \frac{m^3}{s}$

Pertanto, per tale tratto si ottiene:

$$v = 1.50 \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad D = \sqrt{\frac{4 \times 0.04}{\pi \times 1.50}} = 0.184263 \text{ m} = 184.263 \text{ mm}$$

$$v = 0.50 \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad D = \sqrt{\frac{4 \times 0.04}{\pi \times 0.50}} = 0.319253 \text{ m} = 319.253 \text{ mm}$$

I diametri commerciali che appartengono a tale range sono: D1BT=200 mm, D2BT=250 mm e D3BT=300mm.

Impianto elevatorio da campo Pozzi Pantano a Serbatoio Santa Chiara, lungo termine (LT)

La portata da addurre è pari a  $Q_m = 400 \frac{l}{s} = 0.400 \frac{m^3}{s}$

Pertanto, per tale tratto si ottiene:

$$v = 1.50 \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad D = \sqrt{\frac{4 \times 0.4}{\pi \times 1.50}} = 0.582692 \text{ m} = 582.692 \text{ mm}$$

$$v = 0.50 \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad D = \sqrt{\frac{4 \times 0.4}{\pi \times 0.50}} = 1.009252 \text{ m} = 1009.252 \text{ mm}$$

I diametri commerciali che appartengono a tale range sono: D1LT=600 mm, D2LT=700 mm, D3LT=800 mm, e D4LT= 900.

Impianto elevatorio da Serbatoio Santa Chiara a Partitore P12 Monte Compatri, lungo termine (LT)

La portata da addurre è pari a  $Q_m = 360 \frac{l}{s} = 0.360 \frac{m^3}{s}$

Pertanto, per tale tratto si ottiene:

$$v = 1.50 \text{ m/s} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \times 0.36}{\pi \times 1.50}} = 0.55279 \text{ m} = 522.79 \text{ mm}$$

$$v = 0.50 \text{ m/s} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \times 0.36}{\pi \times 0.50}} = 0.95746 \text{ m} = 957.46 \text{ mm}$$

I diametri commerciali che appartengono a tale range sono: D1P12=600 mm, D2P12=700 mm, D3P12=800 mm, e D4P12=900 mm.

### iii. Criterio economico scelta della tubazione

Per la valutazione economica si considera il costo della tubazione del tratto a sollevamento (C1) e il costo dell'energia necessaria per l'impianto di sollevamento (C3)

$$C_1 = L \cdot r \cdot c_m$$

r = tasso di ammortamento calcolato pari a 5.48 %;

cm = costo della tubazione per unità di lunghezza (tabella 1)

In particolare il tasso di ammortamento r è stato calcolato con la seguente formula relativa all'interesse composto:

$$r = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

in cui n rappresenta il numero di anni di vita utile dell'impianto posto pari a 50 ed i il tasso medio di interesse praticato nei 50 anni posto pari al 5%.

Il costo della tubazione al variare del DN, per unità di lunghezza, è ricavato dal prezzario riportato in tabella 2 relativo agli impianti tecnologici idrico-sanitari.

Le spese di esercizio (C2), relative all'impianto di sollevamento, sono state calcolate con la relazione:

$$C_2 = P_o \cdot n \cdot C_{kWh} = \frac{9.8 \cdot Q \cdot H_m}{\eta} \cdot n \cdot C_{kWh}$$

Po = potenza della pompa (kW);

n = 8760 = numero di ore annue di funzionamento;

$C_{kWh} = 0.12 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$  costo unitario dell'energia elettrica;

Q = portata [m<sup>3</sup>/s];

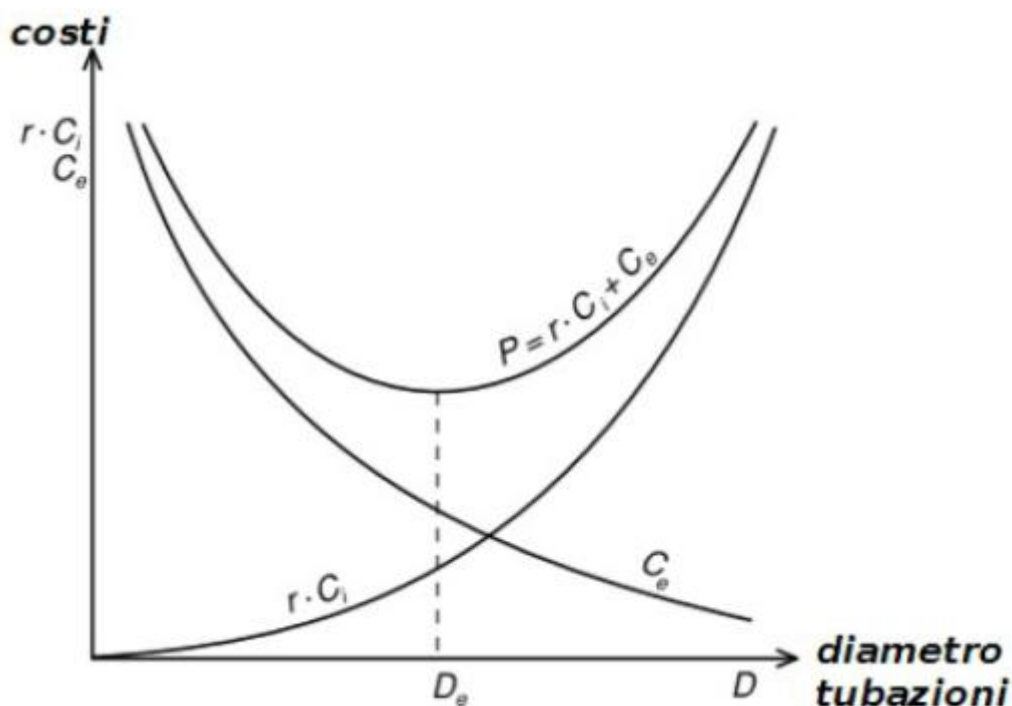
Y = perdite di carico complessive lungo la condotta elevatoria [m];

$H_m = H_g + Y$  = prevalenza manometrica [m];

$\eta = 0.70$  = rendimento del gruppo di pompaggio ipotizzato.

$P = C_1 + C_2$  = Costo totale.

Pertanto per l'applicazione del criterio economico (fig. x) si cercherà per ciascun impianto il valore minimo di P.



Criterio economico per un impianto elevatorio per la scelta del diametro di massimo tornaconto.

Di seguito si riportano per ciascun impianto in argomento le risultanze dei calcoli effettuati

Impianto elevatorio da campo Pozzi Pantano a Serbatoio Santa Chiara, breve termine (BT)

| BT   |           |        |        |
|------|-----------|--------|--------|
| L=   | 6897      | m      |        |
| Hg=  | 218       | m      |        |
| DN   | C1        | C2     | P      |
| [mm] | [€]       | [€]    | [€]    |
| 200  | 66605.28  | 159918 | 226523 |
| 250  | 83001.59  | 138987 | 221989 |
| 300  | 107218.26 | 132972 | 240190 |

Tabella 2: criterio economico di scelta delle tubazioni a breve termine (BT)

Pertanto per questo impianto il diametro di massimo tornaconto risulta essere  $D=250$  mm.

Impianto elevatorio da campo Pozzi Pantano a Serbatoio Santa Chiara, lungo termine (LT).

| LT   |           |            |            |
|------|-----------|------------|------------|
| L=   | 7049      | m          |            |
| Hg=  | 218       | m          |            |
| DN   | C1        | C2         | P          |
| [mm] | [€]       | [€]        | [€]        |
| 600  | 336350.18 | 1422104.68 | 1758454.86 |
| 700  | 392221.92 | 1348582.72 | 1740804.64 |
| 800  | 447939.21 | 1317844.72 | 1765783.93 |
| 900  | 502961.49 | 1303306.48 | 1806267.97 |

Tabella 3: criterio economico di scelta delle tubazioni a lungo termine (LT)

Pertanto per questo impianto il diametro di massimo tornaconto risulta essere  $D=600$  mm.

Impianto elevatorio da Serbatoio Santa Chiara a Partitore PI2 Monte Compatri, lungo termine (LT)

| PI2  |           |            |            |
|------|-----------|------------|------------|
| L=   | 2179      | m          |            |
| Hg=  | 221       | m          |            |
| DN   | C1        | C2         | P          |
| [mm] | [€]       | [€]        | [€]        |
| 600  | 103973.20 | 1203611.87 | 1307585.07 |
| 700  | 121244.37 | 1186739.78 | 1307984.15 |
| 800  | 138467.80 | 1179690.48 | 1318158.29 |
| 900  | 155476.39 | 1176339.18 | 1331815.57 |

Tabella 4: criterio economico di scelta delle tubazioni a lungo termine (PI2)

Pertanto per questo impianto il diametro di massimo tornaconto risulta essere  $D=600$  mm.

#### iv. Verifica statica tubazione DN250

Vengono qui di seguito riportati i risultati della verifica statica, ovvero di tutte le indagini volte a valutare il comportamento della tubazione sottoposta all'azione dei carichi interni ed esterni, nonché del proprio peso. Analizziamo dunque gli stati tensionali su di essa agenti e accertiamoci che siano minori dei valori ammissibili.

| DATI DIMENSIONALI DEL TUBO                                                  |                  | SOVRACCARICO STATICO                    |          |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|----------|
| Diametro tubazione, Ø (mm)                                                  | 274              | Carico concentrato statico, Ps (kN)     | 0.00     |
| Spessore, s (mm)                                                            | 5.5              | Lunghezza impronta, u1 (m)              | 0.00     |
| Materiale tubo                                                              | Ghisa sferoidale | Larghezza impronta, u2 (m)              | 0.00     |
| Modulo di elasticità, Em (kN/m²)                                            | 170000000        | Pressione statica, qs (kN/m²)           | 0        |
| Rapporto diametro esterno/spessore, SDR                                     | 50               | Coefficiente di diffusione, β           | 0.85     |
| Rigidezza circonferenziale, SN (kN/m²)                                      | 118              | Sovraccarico statico, Qs (kN/m)         | 0        |
| DATI DELLO SCAVO                                                            |                  | SOVRACCARICO IDROSTATICO                |          |
| Larghezza, B (m)                                                            | 1.5              | Profondità quota di falda, h' (m)       | 1        |
| Altezza sull'estradosso, H (m)                                              | 2                | Pressione da falda, qf (kN/m²)          | 11.15    |
| Modulo elasticità del rinterro, Et (kN/m²)                                  | 14000            | Carico idrostatico, Qidr (kN/m)         | 3.06     |
| Peso specifico del rinterro, γt (kN/m³)                                     | 20               | CARICO DA FLUIDO TRASPORTATO            |          |
| Angolo di attrito interno, φ (°)                                            | 33               | Diametro interno tubazione, Di (mm)     | 1113     |
| Coefficiente di attrito rinterro/pareti, μ                                  | 0.65             | Carico da fluido trasportato, Qa (kN/m) | 9.54     |
| Coefficiente di rigidezza relativa, n                                       | 1.138            | CARICO TOTALE                           |          |
| Tipo di tubazione                                                           | Flessibile       | Carico statico rinterro, Qst (kN/m)     | 11       |
| Verifica tipo di trincea (UNI 7517)                                         | Larga            | Sovraccarico dinamico, Qd (kN/m)        | 5        |
| Non è applicabile la riduzione del carico per azione attrittiva del terreno |                  | Sovraccarico statico, Qs (kN/m)         | 0        |
| CARICO STATICO RINTERRO                                                     |                  | Carico idrostatico, Qidr (kN/m)         | 3.1      |
| Coefficiente di spinta attiva, Ka                                           | 0.29             | Carico da fluido trasportato, Qa (kN/m) | 9.5      |
| Coefficiente di Marston, χ                                                  | 1.048            | Carico totale, Qtot (kN/m)              | 28.6     |
| Pressione verticale, qst (kN/m²)                                            | 47.2             | REAZIONE LATERALE DEL TERRENO           |          |
| Carico statico rinterro, Qst (kN/m)                                         | 11.0             | Qualità costipazione                    | Moderata |
| SOVRACCARICO DINAMICO                                                       |                  | Grado di costipazione del terreno, fc   | 12       |
| Tipologia rete di traffico                                                  | Stradale         | Coefficiente di rigidità, cr (N/cm³)    | 24       |
| Tipologia di mezzi (DIN1072)                                                | Pesanti          | Pressione laterale del terreno, (kN/m²) | 15.9     |
|                                                                             | HT 38            | Reazione laterale del terreno, (kN/m)   | 3.1      |
| Coefficiente dinamico, ω                                                    | 1.15             | Ottieni i carichi                       |          |
| Carico per ruota, P (kN/ruota)                                              | 62.5             | Esegui verifiche                        |          |
| Pressione dinamica, qd (kN/m²)                                              | 18.4             |                                         |          |
| Sovraccarico dinamico, Qd (kN/m)                                            | 5                |                                         |          |

| Verifica per tubazione FLESSIBILE         |       |
|-------------------------------------------|-------|
| Coefficiente di sottofondo, K             | 0.121 |
| Coefficiente di deformazione differita, F | 1.5   |
| Deformazione del tubo, Δx (mm)            | 2.89  |
| Deformazione percentuale (%)              | 1.05  |
| Tubazione verificata                      |       |
| Verifica                                  |       |

Pressione di collaudo

Valutiamo ora la pressione di collaudo

$$P_c = 1.5 \times (P_{max\ esser} + \Delta P)$$

Dove:

$P_{max\ eser}$  = viene scelta come massimo tra due valori di pressione: il valore di pressione valutato immediatamente a valle dell'impianto di sollevamento in condizioni di esercizio.

$\Delta P$  = sovrappressioni che si generano nel caso di fenomeni moto vario.

La pressione massima di esercizio risulterà essere il valore di pressione valutato immediatamente a valle dell'impianto di sollevamento in condizioni di esercizio pari a 237 m c.a.

Le sovrappressioni  $\Delta P$  sono imposte dal D.M. LL.PP. del 12/12/1985, "Norme tecniche relative alle tubazioni" e risultano essere pari a 53.7 m c.a.

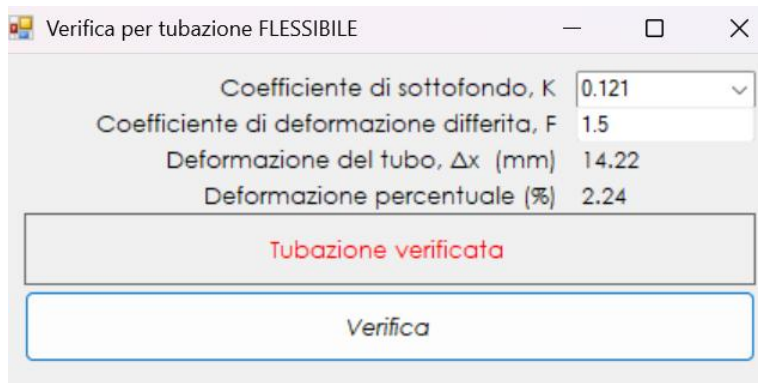
$P_c$  risulta essere quindi pari a 436.05 m c.a. o, equivalentemente,  $P_c = 4.36$  Mpa che è inferiore ai 5Mpa.

### v.Verifica statica tubazione DN600 (LT)

| DATI DIMENSIONALI DEL TUBO                                                 |                  | SOVRACCARICO STATICO                                 |          |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------|----------|
| Diametro tubazione, $\varnothing$ (mm)                                     | 635              | Carico concentrato statico, $P_s$ (kN)               | 0.00     |
| Spessore, $s$ (mm)                                                         | 8.6              | Lunghezza impronta, $u_1$ (m)                        | 0.00     |
| Materiale tubo                                                             | Ghisa sferoidale | Larghezza impronta, $u_2$ (m)                        | 0.00     |
| Modulo di elasticità, $E_m$ (kN/m <sup>2</sup> )                           | 170000000        | Pressione statica, $q_s$ (kN/m <sup>2</sup> )        | 0        |
| Rapporto diametro esterno/spessore, SDR                                    | 74               | Coefficiente di diffusione, $\beta$                  | 0.85     |
| Rigidezza circonferenziale, $S_N$ (kN/m <sup>2</sup> )                     | 36               | Sovraccarico statico, $Q_s$ (kN/m)                   | 0        |
| DATI DELLO SCAVO                                                           |                  | SOVRACCARICO IDROSTATICO                             |          |
| Larghezza, $B$ (m)                                                         | 3.00             | Profondità quota di falda, $h'$ (m)                  | 1        |
| Altezza sull'estradosso, $H$ (m)                                           | 4.00             | Pressione da falda, $q_f$ (kN/m <sup>2</sup> )       | 32.54    |
| Modulo elasticità del rinterro, $E_t$ (kN/m <sup>2</sup> )                 | 14000            | Carico idrostatico, $Q_{idr}$ (kN/m)                 | 20.66    |
| Peso specifico del rinterro, $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )               | 20               | CARICO DA FLUIDO TRASPORTATO                         |          |
| Angolo di attrito interno, $\phi$ (°)                                      | 33               | Diametro interno tubazione, $D_i$ (mm)               | 1113     |
| Coefficiente di attrito rinterro/pareti, $\mu$                             | 0.65             | Carico da fluido trasportato, $Q_a$ (kN/m)           | 9.54     |
| Coefficiente di rigidezza relativa, $n$                                    | 3.842            | CARICO TOTALE                                        |          |
| Tipo di tubazione                                                          | Flessibile       | Carico statico rinterro, $Q_{st}$ (kN/m)             | 50.8     |
| Verifica tipo di trincea (UNI 7517)                                        | Larga            | Sovraccarico dinamico, $Q_d$ (kN/m)                  | 8.5      |
| Non è applicabile la riduzione del carico per azione attritiva del terreno |                  | Sovraccarico statico, $Q_s$ (kN/m)                   | 0        |
| CARICO STATICO RINTERRO                                                    |                  | Carico idrostatico, $Q_{idr}$ (kN/m)                 | 20.7     |
| Coefficiente di spinta attiva, $K_a$                                       | 0.29             | Carico da fluido trasportato, $Q_a$ (kN/m)           | 9.5      |
| Coefficiente di Marston, $\chi$                                            | 1.048            | Carico totale, $Q_{tot}$ (kN/m)                      | 89.5     |
| Pressione verticale, $q_{st}$ (kN/m <sup>2</sup> )                         | 94.1             | REAZIONE LATERALE DEL TERRENO                        |          |
| Carico statico rinterro, $Q_{st}$ (kN/m)                                   | 50.8             | Qualità costipazione                                 | Moderata |
| SOVRACCARICO DINAMICO                                                      |                  | Grado di costipazione del terreno, $f_c$             | 12       |
| Tipologia rete di traffico                                                 | Stradale         | Coefficiente di rigidità, $c_r$ (N/cm <sup>3</sup> ) | 48       |
| Tipologia di mezzi (DIN1072)                                               | Pesanti          | Pressione laterale del terreno, (kN/m <sup>2</sup> ) | 111.7    |
|                                                                            | HT 60            | Reazione laterale del terreno, (kN/m)                | 50.2     |
| Coefficiente dinamico, $\omega$                                            | 1.08             | Ottieni i carichi                                    |          |
| Carico per ruota, $P$ (kN/ruota)                                           | 100              | Esegui verifiche                                     |          |
| Pressione dinamica, $q_d$ (kN/m <sup>2</sup> )                             | 13.4             |                                                      |          |
| Sovraccarico dinamico, $Q_d$ (kN/m)                                        | 8.5              |                                                      |          |

In tal caso la tubazione è flessibile.

Per la verifica è stata applicata la trattazione di Marston-Spangler:



Pressione di collaudo

Valutiamo ora la pressione di collaudo

$$P_c = 1.5 \times (P_{\max \text{ eser}} + \Delta P)$$

Dove:

$P_{\max \text{ eser}}$  = viene scelta come massimo tra due valori di pressione: il valore di pressione valutato immediatamente a valle dell'impianto di sollevamento in condizioni di esercizio.

$\Delta P$  = sovrappressioni che si generano nel caso di fenomeni moto vario.

La pressione massima di esercizio risulterà essere il valore di pressione valutato immediatamente a valle dell'impianto di sollevamento in condizioni di esercizio pari a 234 m c.a.

Le sovrappressioni  $\Delta P$  sono imposte dal D.M. LL.PP. del 12/12/1985, "Norme tecniche relative alle tubazioni" e risultano essere pari a 53.4 m c.a.

$P_c$  risulta essere quindi pari a 431.1 m c.a. o, equivalentemente,  $P_c = 4.31$  Mpa che è inferiore ai 5Mpa.

## VII. Verifica dei transitori idraulici nel sistema idrico Appio - Alessandrino a lungo e breve termine

### a. Introduzione

La presente relazione tecnica illustra le verifiche condotte sui transitori idraulici (colpi d'ariete) a lungo termine in due condotte principali del sistema idrico Appio - Alessandrino. Tali condotte collegano rispettivamente: (1) il campo pozzi Pantano al serbatoio Santa Chiara, e (2) il serbatoio Santa Chiara al partitore Monte Compatri. L'analisi è finalizzata a valutare il comportamento del sistema in caso di manovre estreme (ad esempio arresto improvviso delle pompe simulante un black out accidentale) e a verificare l'efficacia dei dispositivi di protezione installati contro i fenomeni di moto vario a lungo termine.

Per mitigare le sovrappressioni e depressioni da colpo d'ariete sono stati previsti appositi sistemi di protezione. In particolare, si è adottato l'inserimento di casse d'aria in derivazione alle condotte in pressione. Le casse d'aria sono serbatoi contenenti acqua e aria in pressione, collegati alla condotta premente; in condizioni di regime la pressione interna della cassa coincide con quella della condotta. In caso di variazioni brusche di portata, la compressibilità dell'aria consente di assorbire le oscillazioni di pressione, attenuando sia i picchi di sovrappressione sia le depressioni e prevenendo la separazione della colonna fluida.

Gli obiettivi di progetto per il sistema di protezione sono di limitare le sovrappressioni a valori controllati e di evitare pressioni negative nella rete. In particolare, si è mirato a contenere gli incrementi di pressione entro circa 6-7 bar ( $\approx 70$  m di colonna, valore previsto in Tabella III allegata al DM 12.12.1985 – “Norme tecniche relative alle tubazioni”) oltre il carico statico e ad evitare che durante i transitori si generino pressioni inferiori a quella atmosferica. Come ulteriore criterio di sicurezza, si è considerato che eventuali depressioni che inevitabilmente potrebbero ingenerarsi, non dovrebbero comunque superare un vuoto equivalente a 8–9 m di colonna d'acqua, soglia prudenziale per prevenire fenomeni di cavitazione locale. La verifica “a lungo termine” dei transitori consiste nel simulare l'evoluzione temporale delle oscillazioni di pressione fino al loro completo smorzamento, assicurandosi che il sistema ritorni a una condizione stabile senza danni né anomalie residue.

Di seguito si descrivono le caratteristiche delle due condotte analizzate, la metodologia adottata per l'analisi dei transitori, i principali risultati ottenuti (supportati da grafici e profili idraulici esplicativi) e le conclusioni tecniche derivanti dallo studio.

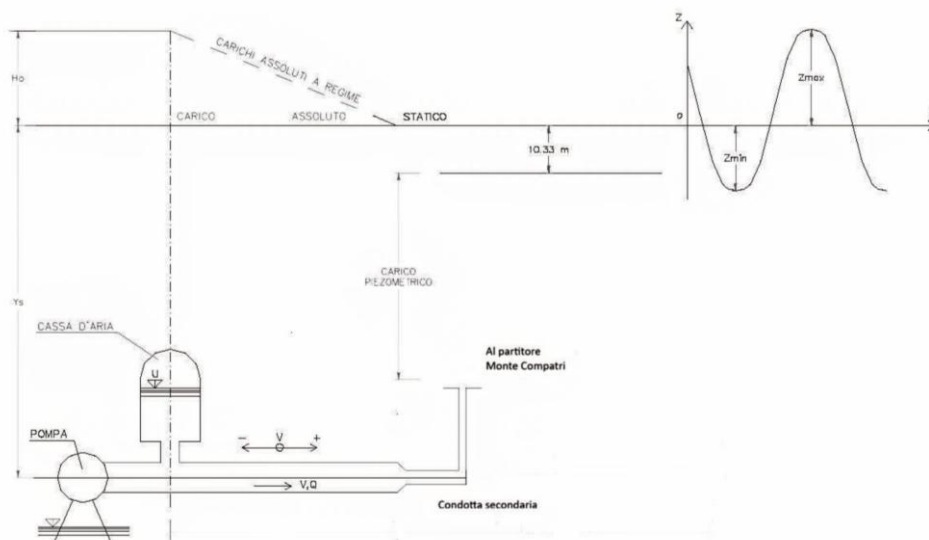
#### Descrizione dei sistemi esaminati

I due tronchi di acquedotto oggetto di analisi appartengono allo schema idrico Appio - Alessandrino e presentano caratteristiche differenti in termini di funzione (spinta da pompaggio vs alimentazione per caduta) e protezioni installate. In sintesi:

Campo pozzi Pantano – Serbatoio Santa Chiara: condotta in pressione in ghisa sferoidale DN=600 mm, lunga  $L = 7049$  m che convoglia una portata di  $Q = 400$  L/s dal campo pozzi (stazione di pompaggio Pantano) fino al serbatoio di Santa Chiara, posto in quota. La condotta supera un dislivello geodetico  $H_g$  significativo (ordine di 218 m) ed è soggetta a un carico di pompaggio  $H_m \approx 234$  m. Per la protezione dai transitori è installata, immediatamente a valle delle pompe, una cassa d'aria da 15 m<sup>3</sup> collegata in derivazione. Nel punto di collegamento tra condotta e serbatoio d'aria è presente una strozzatura calibrata (orificio) del diametro di 150 mm, dimensionata secondo il criterio di De Sparre (detta “strozzatura ottima”). Questo sistema protegge la condotta Pantano–Santa Chiara attenuando colpi d'ariete sia in sovrappressione sia in depressione.



- 38



Schema idraulico utilizzato

Le caratteristiche geometriche (lunghezze, dislivelli) e di portata delle due condotte, insieme alla presenza delle casse d'aria con relativi orifizi calibrati, costituiscono la base per l'analisi dei transitori. Nelle sezioni seguenti si descrivono le modalità di calcolo del colpo d'ariete e si presentano i risultati ottenuti per ciascuna condotta.

## b. Metodologia di analisi dei transitori

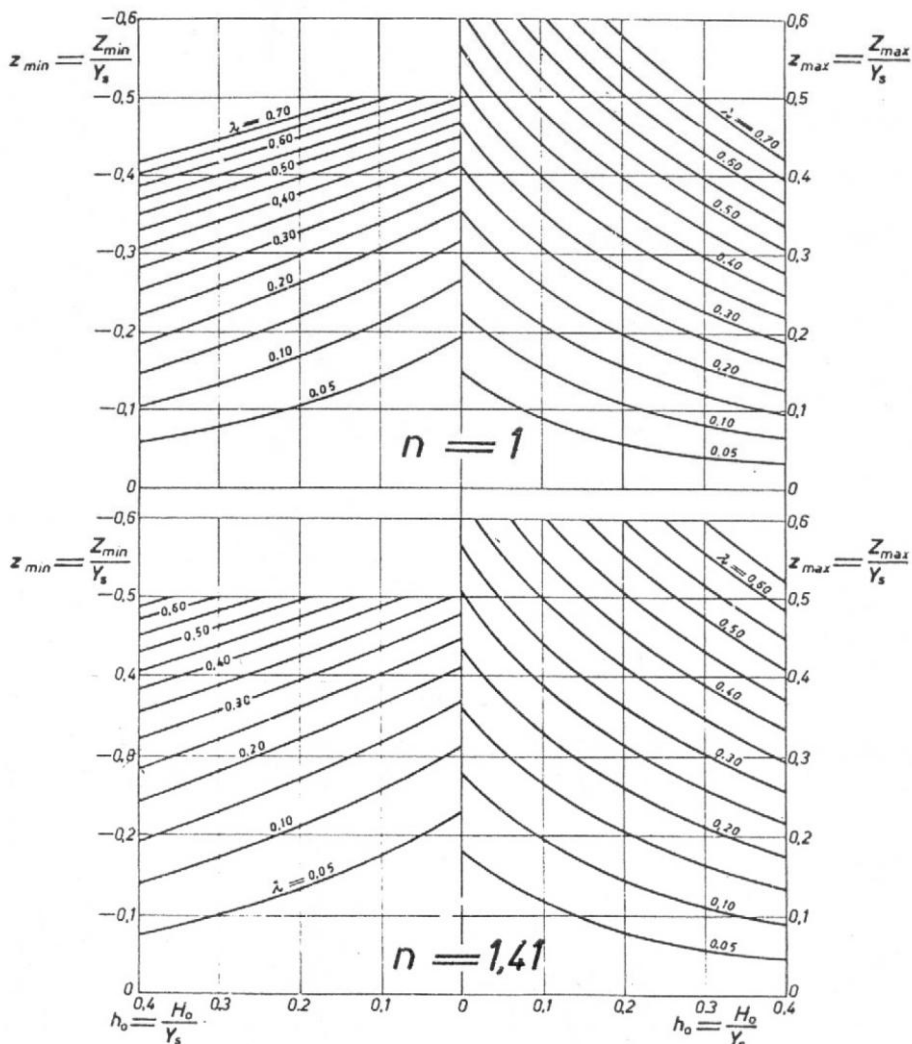
L'analisi dei transitori idraulici è stata condotta mediante simulazioni al calcolatore utilizzando il software Hammer basate sul metodo delle caratteristiche, tenendo conto dei parametri delle condotte e dei dispositivi di protezione descritti. Si è considerato, per ciascuna condotta, lo scenario più gravoso consistente nell'arresto istantaneo e totale della portata di progetto (condizione di "trip" delle pompe e chiusura rapida della valvola di non ritorno nell'ordine di 5 s). Questa manovra repentina rappresenta il caso peggiore in termini di colpo d'ariete e quindi permette di dimensionare e verificare in sicurezza i dispositivi di mitigazione. Inoltre, nelle simulazioni si è adottata la condizione di condotte nuove e pulite, assumendo il valore minimo plausibile di perdite di carico distribuite: questa ipotesi, conforme alle indicazioni di progetto, conduce a stime conservative dei volumi di gas richiesti nelle casse d'aria (minore smorzamento dovuto agli attriti) e massimizza le escursioni di pressione attese.

Per quanto concerne la modellazione delle casse d'aria, si è considerato il comportamento termo-elastico dell'aria al loro interno. In particolare, si è fatto riferimento a un processo adiabatico durante le rapide oscillazioni iniziali, ipotizzando un esponente politropico  $n \approx 1,2 \div 1,4$  (tipico dell'evoluzione adiabatica). Ciò porta a stimare oscillazioni di pressione leggermente maggiori rispetto al caso isotermico ( $n = 1$ ) ed è quindi una scelta cautelativa ai fini progettuali. La prima fase del transiente è infatti molto rapida, giustificando

l'assunzione adiabatica come la più realistica in tali condizioni di progetto. Per le fasi più lente e a lungo termine, l'andamento si approssima eventualmente a condizioni politropiche meno severe, ma ai fini della verifica di sicurezza il riferimento ad  $n$  più elevati garantisce un margine aggiuntivo.

La strozzatura ottima (di De Sparre) inserita tra condotta e cassa d'aria è stata dimensionata in modo da ottenere un efficace smorzamento delle oscillazioni di pressione. In termini teorici, la strozzatura "ottima" è definita dalla condizione che la perdita di carico introdotta dall'orifizio, alla portata di regime  $v_0$ , generi nell'istante iniziale la stessa caduta di pressione  $Z_{min}$  che si avrebbe al termine della fase di depressione. Matematicamente, il coefficiente di perdita  $K_0$  dell'orifizio ottimo soddisfa la relazione  $K_0 = H_0 + |Z_{min}|$ , dove  $H_0$  rappresenta le perdite distribuite lungo la condotta a portata nominale e  $Z_{min}$  è l'abbassamento di piezometrica (valore negativo) ammesso durante il transiente. Tale calibrazione garantisce che la strozzatura opponga al flusso una resistenza tale da smorzare in modo critico l'oscillazione: in pratica l'orifizio dissipa energia durante il passaggio di acqua dalla condotta alla cassa e viceversa, riducendo l'ampiezza dei picchi di pressione. L'impiego di una strozzatura calibrata consente quindi di ottenere, a parità di sicurezza, volumi di cassa d'aria nettamente inferiori rispetto al caso di una semplice connessione senza strozzatura. Nel caso in esame si è scelto di adottare tale configurazione ottimizzata, sfruttando i benefici in termini di riduzione del volume richiesto e di più rapido smorzamento delle oscillazioni. (Si noti tuttavia che, in generale, l'implementazione di una strozzatura introduce anche una piccola perdita di carico continua in esercizio; nel nostro caso tale penalizzazione è minima e accettabile rispetto ai vantaggi ottenuti).

Il dimensionamento preliminare delle casse d'aria è stato effettuato con metodi analitici noti in letteratura, combinando le equazioni di stato del gas e la continuità del flusso con l'equazione di Allievi-Joukowski per la stima delle variazioni di pressione. In particolare, si sono utilizzati i grafici e le formule suggeriti dalla teoria dei colpi d'ariete di Evangelisti, secondo cui noti il carico di regime  $h_0$  e l'entità massima della sovrappressione ammissibile  $|Z_{min}|$ , è possibile ricavare i parametri adimensionali  $\lambda$  e  $z$  (da cui  $Z_{max}$ ).



### Cassa d'aria con strozzatura – Curve $z_{max}=z_{max}(h_0, \lambda)$ e $z_{min}=z_{min}(h_0, \lambda)$ per $n=1$ e $n=1.41$

Successivamente si calcola volume utile US della camera d'aria necessario (ovvero il volume di gas compresso/scaricato durante l'oscillazione) e quindi il volume massimo  $U_{max} = US (H_s/(H_s - |Z_{min}|))^{1/(1.2-1.4)}$  (con  $H_s = H_g + 10.33$  m), della camera, tenendo conto anche del volume d'acqua entrante. Per la sicurezza strutturale e funzionale, il volume totale della cassa d'aria viene infine maggiorato: si adotta in genere un margine del +30% sopra  $U_{max}$  calcolato, per assicurare lo spazio destinato all'acqua e per compensare eventuali approssimazioni. Nel nostro progetto, i volumi installati (15 m<sup>3</sup> e 5 m<sup>3</sup>) includono già tale margine, risultando adeguati alle esigenze di smorzamento. Le pressioni di pre-carica delle casse d'aria sono state impostate pari alla pressione di regime in condotta (circa 23 bar per Pantano-S.Chiera e 20 bar per S.Chiera-M.Compatri, corrispondenti alle prevalenze  $H_m$  indicate), in modo da massimizzare il volume d'aria disponibile evitando al contempo flussi indesiderati in condizioni normali.

Le simulazioni transitorie sono state condotte nel dominio del tempo fino al completo esaurimento delle oscillazioni di pressione (circa 2 minuti di calcolo). Ciò ha permesso di valutare il comportamento a lungo termine, verificando che dopo l'evento perturbativo iniziale (arresto/chiusura) il sistema converge verso un nuovo stato di equilibrio stazionario (ad es. condotta ferma con pressione statica uniforme) senza instabilità. I risultati sono presentati di seguito tramite grafici del profilo piezometrico e andamenti temporali di pressione/portata, con e senza i dispositivi di protezione, per evidenziare l'efficacia di questi ultimi.

Risultati dell'analisi dei transitori

Di seguito si riportano i risultati principali delle simulazioni di colpo d'ariete per le due condotte in esame, distintamente per: (A) condotta Pantano – Santa Chiara e (B) condotta Santa Chiara – Monte Compatri. Per ciascuna tratta si presentano sia i profili piezometrici longitudinali (con indicazione delle massime e minime pressioni registrate lungo la condotta durante il transiente) sia gli andamenti temporali di pressione e portata in corrispondenza delle casse d'aria. In tal modo si può confrontare il comportamento del sistema senza protezioni rispetto al caso protetto dalle casse d'aria, valutando quantitativamente l'attenuazione delle sovra/depressioni e i tempi di smorzamento delle oscillazioni.

### c. A. Transitorio nella condotta Pantano – Santa Chiara

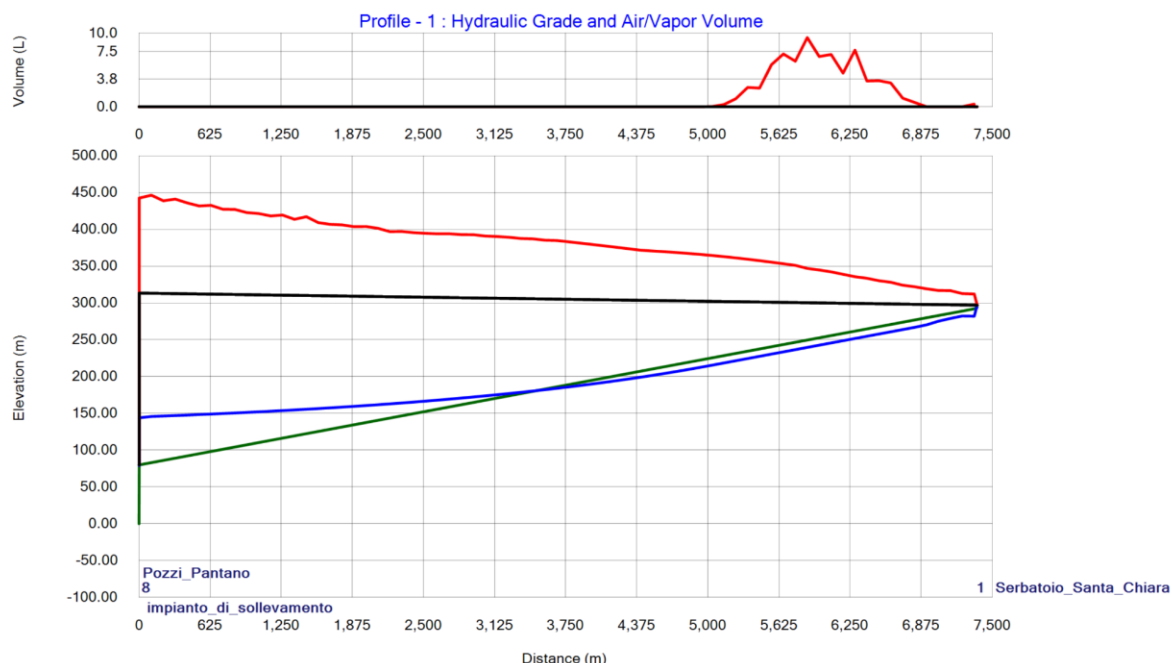


Fig. I

In Figura I è mostrato il profilo idraulico lungo la condotta Pantano – S. Chiara in assenza di protezioni (nessuna cassa d'aria attiva). La linea verde rappresenta la quota altimetrica del terreno, mentre la linea nera indica il profilo piezometrico iniziale in condizioni stazionarie (con la pompa in funzione a 400 L/s). A seguito di un arresto improvviso delle pompe al campo pozzi Pantano, si innesca un'onda di depressione che viaggia

verso monte: il grafico mostra che in corrispondenza del punto alto della condotta si raggiunge la pressione di vapore dell'acqua, con conseguente separazione della colonna liquida. Ciò è evidenziato dalla porzione rossa nel grafico superiore, corrispondente alla formazione di un volume di gas (aria/vapore) di circa 8 litri in condotta. Questo fenomeno indica che la pressione locale è scesa sotto il valore di saturazione, generando una cavità (un vuoto parziale) di tale volume. Contestualmente, presso la stazione di pompaggio a monte (sinistra del grafico), l'arresto del flusso provoca un significativo colpo d'ariete positivo: la linea rossa (profilo massimo piezometrico durante il transitorio) mostra un picco di pressione molto elevato vicino alle pompe. Le pressioni minime (linea blu) risultano fortemente negative in vari punti del tracciato, scendendo fin sotto la quota del terreno in corrispondenza dei punti alti (suggerendo pressioni sub-atmosferiche marcate). In sintesi, senza adeguate protezioni la condotta subirebbe sovraccarichi e depressioni potenzialmente distruttivi: l'onda di pressione avrebbe ampiezza tale da superare la resistenza della tubazione, e la formazione/richiusa improvvisa della sacca di vapore potrebbe causare colpi d'ariete secondari ancora più violenti.

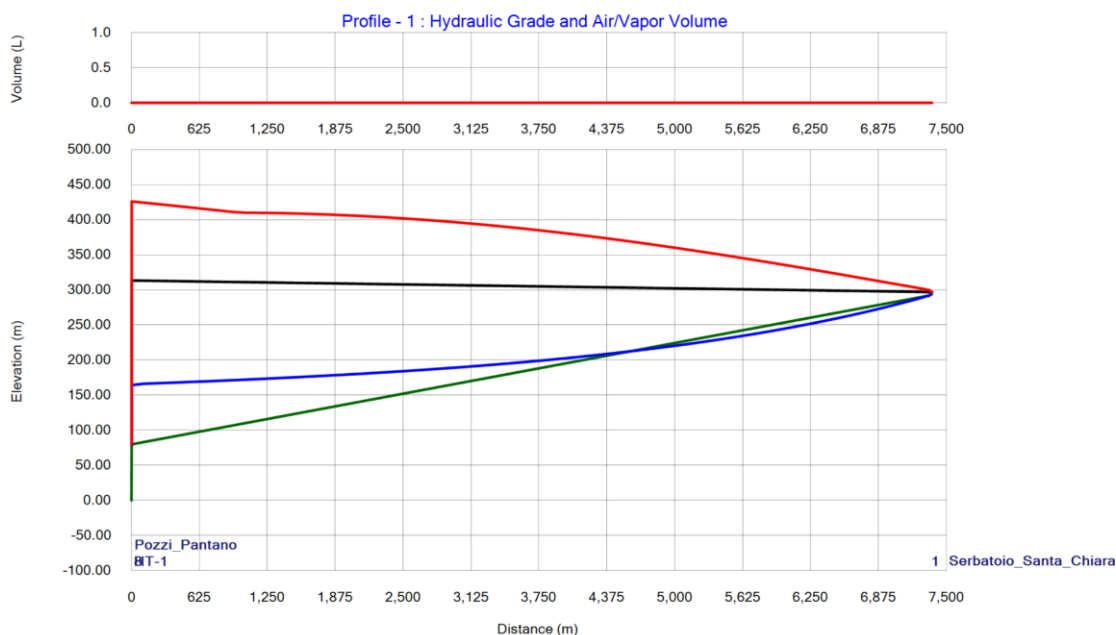


Fig. 2

In Figura 2 viene mostrato il profilo idraulico lungo la condotta Pantano – S. Chiara con l'installazione della cassa d'aria da 15 m<sup>3</sup> (protezione attiva, strozzatura da 150 mm). In questa simulazione si osserva un netto miglioramento delle condizioni transitorie: la linea rossa (massimo piezometrico) e la linea nera (minimo piezometrico) rimangono entro limiti di sicurezza lungo tutto il tracciato. In particolare, le pressioni minime non scendono al di sotto della linea atmosferica (che corrisponde approssimativamente alla quota terreno in un punto alto, considerando l'assenza di vuoto); infatti, non si forma alcuna sacca di vapore in condotta, come confermato dall'assenza di porzioni colorate nel grafico del volume aria/vapore. La cassa d'aria fornisce quindi l'acqua necessaria a mantenere la pressione sopra il valore critico nei punti alti durante la fase di depressione.

Allo stesso tempo, le sovrappressioni risultano attenuate: il picco di pressione a monte è notevolmente inferiore rispetto al caso non protetto (la linea rossa è di poco superiore al profilo iniziale blu). Si riesce così a contenere l'innalzamento di pressione entro pochi bar sopra il regime, in accordo con i criteri di progetto. Complessivamente, il profilo con cassa d'aria evidenzia oscillazioni di entità molto minore e distribuite in modo più uniforme, a conferma dell'efficacia del dispositivo nel smorzare il colpo d'ariete sia in fase di risalita che di discesa di pressione.

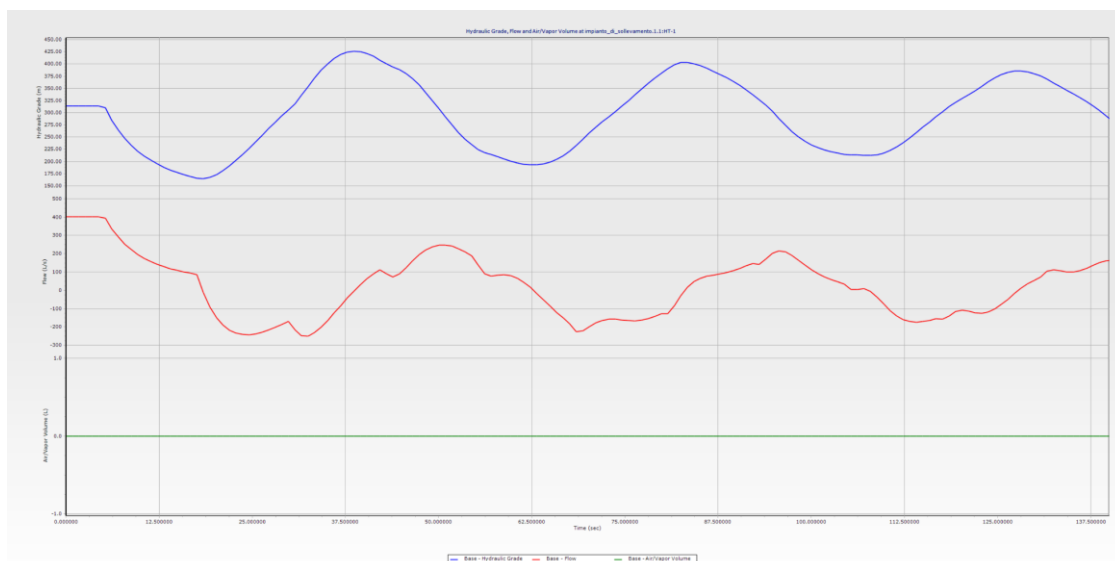


Fig. 3

In Figura 3 viene mostrato l'andamento temporale dettagliato presso la cassa d'aria Pantano – S. Chiara durante il transiente (caso protetto). La figura mostra la variazione nel tempo del carico piezometrico (linea blu, scala a sinistra in metri) e della portata istantanea (linea rossa, scala a destra in L/s) misurati nel punto di collegamento della cassa d'aria (a valle delle pompe). In condizioni iniziali ( $t = 0$ ) la pressione è circa costante al valore di regime ( $\approx 234$  m di colonna, corrispondente alla prevalenza di pompaggio) e la portata è 400 L/s verso il serbatoio. All'istante dell'arresto pompa ( $t = 0^+$ ) si registra un brusco calo di pressione (linea blu): il carico piezometrico scende rapidamente a causa dell'onda di depressione generata dall'interruzione di flusso. La cassa d'aria reagisce immediatamente cedendo acqua alla condotta: questo si riflette in una portata negativa (linea rossa sotto lo zero) che indica flusso dalla cassa verso la tubazione. Dopo il minimo iniziale (attorno a  $t \approx 20-30$  s), la pressione inizia a risalire per inerzia, superando il livello originario e raggiungendo un picco di sovrappressione (linea blu sopra il valore iniziale). La cassa d'aria a questo punto assorbe acqua (comprimendo l'aria interna) e la portata attraverso l'orifizio diventa positiva (flusso dalla condotta verso la cassa). Si innesca così un'oscillazione: la pressione oscilla attorno al valore di regime e la portata attraverso la cassa alterna segno (entrata/uscita) seguendo le fasi di espansione e compressione dell'aria. Dalla figura si nota come tali oscillazioni vengano progressivamente smorzate: l'ampiezza dei picchi di pressione e dei cicli di

flusso diminuisce col tempo, grazie alle perdite di energia (attriti nel sistema e strozzatura). Nel lungo termine (oltre 2 minuti dall'evento) il sistema raggiunge una nuova condizione di equilibrio: la portata si stabilizza a 0 (condotta ferma) e la pressione si uniforma gradualmente verso il valore statico (circa 242 m al serbatoio Santa Chiara, corrispondenti alla quota geodetica). Il transitorio può quindi dirsi estinto senza che siano mai stati raggiunti valori di pressione pericolosi né nel senso positivo né negativo, confermando la validità del dimensionamento della cassa d'aria.

#### d. B. Transitorio nella condotta Santa Chiara – Monte Compatri

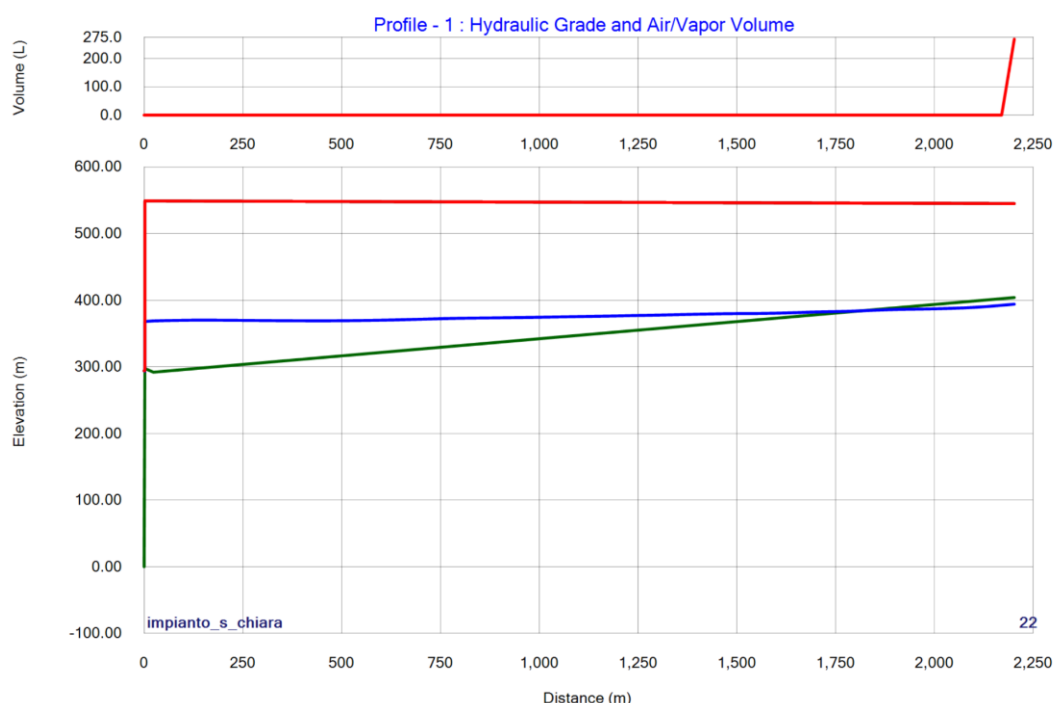


Fig. 4

In Figura 4 viene mostrato il profilo idraulico lungo la condotta S. Chiara – M. Compatri in assenza di protezioni (cassa d'aria non inserita). In questo scenario, il flusso iniziale di 360 L/s dal serbatoio Santa Chiara verso il partitore Monte Compatri viene interrotto bruscamente (chiusura improvvisa della valvola di arrivo al partitore). La conseguente onda di colpo d'ariete produce effetti sia a valle che a monte della condotta. Sul lato destro del grafico (partitore, fine condotta) la linea blu del minimo piezometrico scende drasticamente: la pressione crolla ben sotto il valore atmosferico, causando un ingresso d'aria attraverso la valvola di sfianto automatica prevista al partitore (indicata come AV-1). Il grafico dei volumi in alto mostra infatti l'immissione di un volume d'aria di circa 275 litri nella condotta al nodo di Monte Compatri, corrispondente al colpo di depressione sviluppatosi. Questo grande cuscino d'aria entra per impedire pressioni negative eccessive, ma la sua successiva ricombinazione con la colonna d'acqua potrebbe generare ulteriori colpi di ariete secondari molto violenti. Anche in questo caso, dunque, la mancanza di un adeguato sistema di protezione esporrebbe

la condotta a colpi d'ariete distruttivi (vuoti seguiti da colpi per richiudimento dell'aria, e sovrappressioni oltre i limiti strutturali).

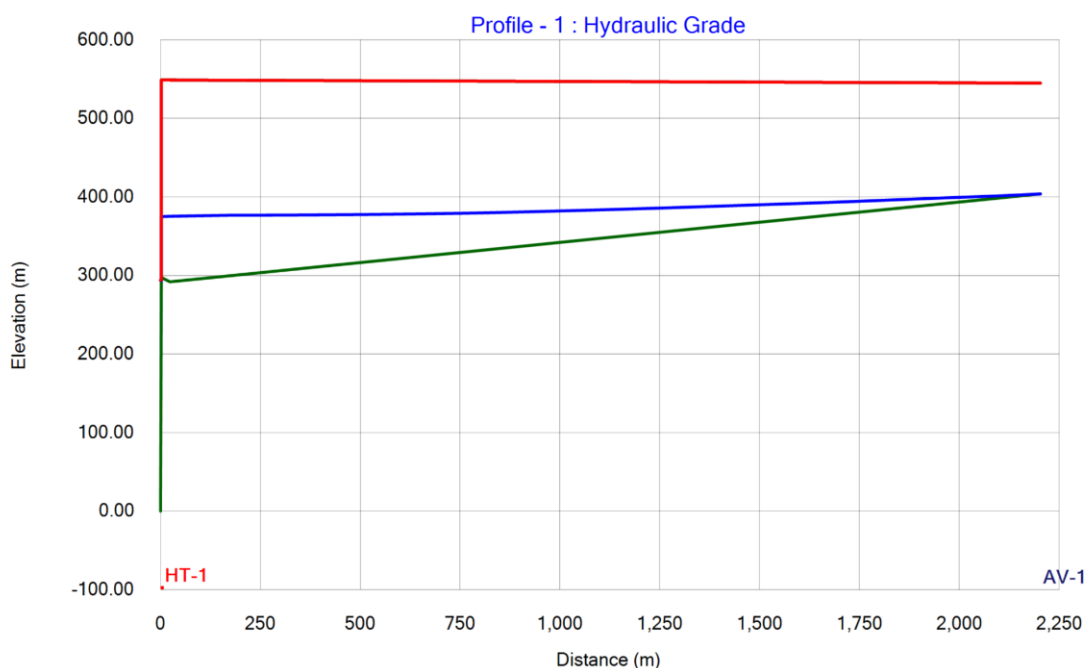


Fig. 5

In Figura 5 viene mostrato il profilo idraulico lungo la condotta S. Chiara – M. Compatri con cassa d'aria 5 m<sup>3</sup> installata a monte (presso S. Chiara, strozzatura  $\varnothing 200$  mm). Si può notare come l'introduzione della cassa d'aria modifichi radicalmente il comportamento transitorio, analogamente a quanto visto per l'altra condotta. La pressione minima lungo il tracciato (linea blu) rimane sopra il livello terreno in ogni sezione: in particolare, al partitore di Monte Compatri non si riscontra caduta di pressione al di sotto di 0 bar, per cui non vi è ingresso d'aria significativa dalla valvola di sfiato (il grafico dei volumi non indica cavità formate). La cassa d'aria ha infatti fornito l'acqua necessaria a compensare la rarefazione, impedendo che si creasse il vuoto in condotta. L'onda di pressione viene quindi efficacemente smorzata dal combinato effetto della compressione dell'aria nella cassa e della perdita introdotta dall'orifizio calibrato, che dissipa l'energia in eccesso. L'intero profilo transitorio risulta ora addolcito: la differenza tra la linea di massimo e minimo (in rosso e nero) è ridotta rispetto al caso precedente, indicando oscillazioni di ampiezza minore. Non si rilevano situazioni critiche né di vuoto né di eccesso di pressione, a garanzia dell'integrità della condotta durante il transiente.

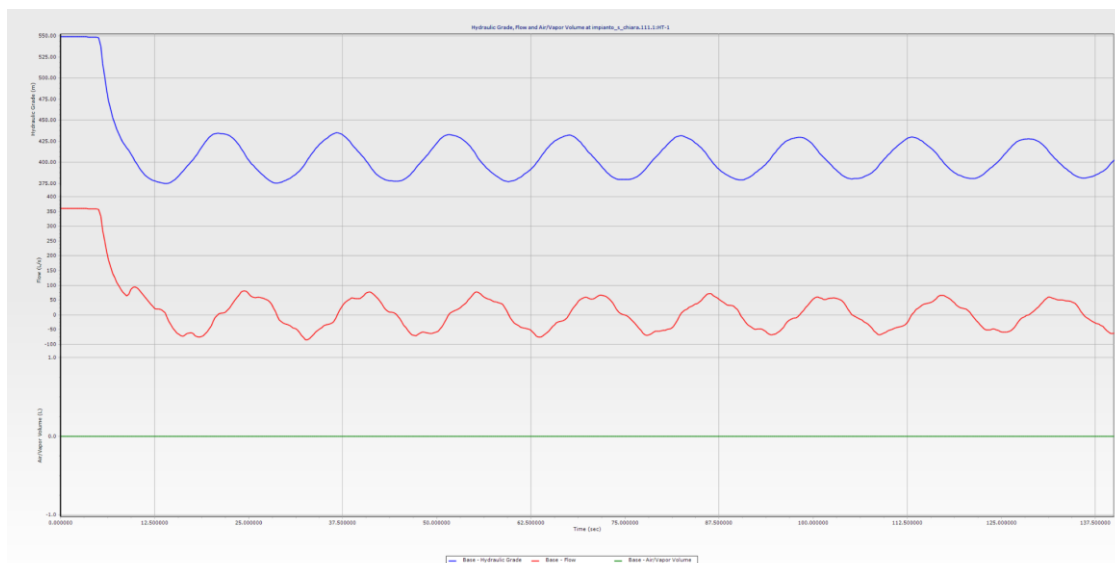


Fig. 6

In Figura 6 viene mostrato l'andamento temporale di carico e portata presso la cassa d'aria di Santa Chiara (condotta S. Chiara – M. Compatri) in caso di chiusura improvvisa a valle (caso protetto). Il grafico, simile a quello già visto per Pantano, evidenzia la risposta della camera d'aria situata all'inizio della condotta in discesa. La linea blu (carico piezometrico) parte dal valore iniziale corrispondente al livello del serbatoio Santa Chiara (circa 525 m s.l.m.) e subisce subito un aumento repentino quando la valvola di monte Compatri si chiude: l'acqua in moto viene bruscamente rallentata e tende a comprimere l'acqua a monte, facendo innalzare la pressione. La cassa d'aria interviene assorbendo parte di questa eccedenza idrica: la sua pressione interna sale (picco blu) ma meno di quanto sarebbe avvenuto senza protezione, perché una porzione di acqua viene spinta nel serbatoio d'aria comprimendo l'aria. La linea rossa della portata mostra infatti un picco positivo immediatamente dopo la chiusura (flusso dall'acquedotto verso la cassa d'aria). In seguito, la pressione comincia a diminuire oscillando sotto il valore iniziale man mano che l'onda di ritorno crea una depressione relativa: la cassa rilascia acqua (flusso inverso, linea rossa negativa) per sostenere la pressione. Anche in questo caso si instaurano oscillazioni attenuate: la pressione oscilla attorno al livello normale del serbatoio e la portata inversione/uscita attraverso la cassa segue con fase opposta, smorzandosi progressivamente. Entro circa 2–3 minuti, il sistema tende alla quiete: la pressione al punto di monte si ristabilizza attorno al livello del serbatoio (condizione statica) e la portata oscillante si annulla. Le oscillazioni residue di pressione risultano molto piccole e rientrano nell'oscillazione di equilibrio del serbatoio aperto. Dunque, grazie alla cassa d'aria, il transitorio viene gestito senza che la pressione a monte superi valori critici né scenda sotto al limite di sicurezza atmosferico, e l'intera condotta torna in condizioni di esercizio normali dopo il transiente.

### **e. Conclusioni**

Lo studio condotto sui transitori idraulici del sistema Appio - Alessandrino ha confermato la necessità e l'efficacia delle casse d'aria previste in progetto per la protezione delle condotte principali Pantano–Santa Chiara e Santa Chiara–Monte Compatri. In assenza di tali dispositivi, le simulazioni evidenziano colpi d'ariete potenzialmente distruttivi: sovrappressioni ben oltre i limiti di sicurezza e depressioni estreme con conseguente ingresso d'aria/cavitazione nelle tubazioni. Questi fenomeni metterebbero a rischio l'integrità delle condotte (rottture per eccesso di pressione, collasso strutturale per vuoto, colpi secondari da slam di colonne d'acqua).

Con l'adozione delle casse d'aria di volumi 15 m<sup>3</sup> e 5 m<sup>3</sup> opportunamente dimensionate, dotate di strozzature calibrate (Ø 150 mm e 200 mm rispettivamente), il comportamento dinamico delle condotte rientra nei limiti di progetto. I risultati mostrano che le oscillazioni di pressione successive alle manovre impulsive vengono efficacemente attenuate: le sovrappressioni massime sono contenute entro pochi bar aggiuntivi rispetto alle condizioni di regime e le depressioni minime non scendono sotto la pressione atmosferica. In nessun punto delle condotte si raggiunge la tensione di vapore dell'acqua, evitando completamente la formazione di sacche di vapore o l'ingresso di aria esterna. Di conseguenza, si preveniene l'innescio di colpi d'ariete secondari e si riducono notevolmente gli stress alternati sulle tubazioni.

Dal punto di vista quantitativo, l'impiego delle strozzature ottimizzate ha consentito di minimizzare i volumi delle casse d'aria necessari garantendo al contempo la protezione desiderata. La camera d'aria da 15 m<sup>3</sup> a Pantano, con orifizio calibrato da 150 mm, e quella da 5 m<sup>3</sup> a Santa Chiara, con orifizio da 200 mm, sono risultate dimensionate correttamente: esse assicurano un margine sufficiente ad assorbire le oscillazioni (volume d'aria aggiuntivo disponibile superiore di circa il 30% al volume effettivamente variato nel transiente, secondo le raccomandazioni progettuali). Le pressioni operative delle casse sono coerenti con i carichi di linea e garantiscono tempi di risposta immediati al presentarsi dei transitori.

In conclusione, le verifiche a lungo termine indicano che, grazie ai sistemi di protezione adottati, il sistema idrico Appio - Alessandrino può operare in sicurezza anche in condizioni di transitorio estremo. Dopo gli eventi perturbativi simulati, le condotte tornano allo stato di quiete senza danni, con oscillazioni smorzate nel giro di pochi minuti. Si raccomanda infine di prevedere un monitoraggio periodico e la manutenzione delle casse d'aria (controllo dei pressostati, delle valvole di strozzatura e dell'integrità strutturale) per assicurare il mantenimento nel tempo dell'efficacia protettiva riscontrata in queste simulazioni. Con le precauzioni progettuali illustrate e una corretta gestione operativa, il rischio di colpi d'ariete distruttivi nel sistema Appio - Alessandrino risulta adeguatamente mitigato, garantendo la continuità e la sicurezza del servizio idrico.

Inoltre per quanto concerne il Breve termine dal Campo pozzi Pantano fino al Serbatoio Santa Chiara, DN=250 mm L=6897 m e Q=40l/s, dalle analisi condotte (fig. 7) si evince che non vi è alcuna necessità di

organo di attenuazione. Ciononostante si provvederà, a vantaggio di resilienza idraulica, ad inserire una valvola anticipatrice di colpo d'ariete. Infine per quanto attiene il tempo di chiusura (o apertura) minimo da garantire al partitore di monte Compatri della TCV DN 600 si precisa che dai calcoli effettuati tale tempo dovrà almeno essere di 240 s (4 min), per evitare sovrappressioni inaccettabili.

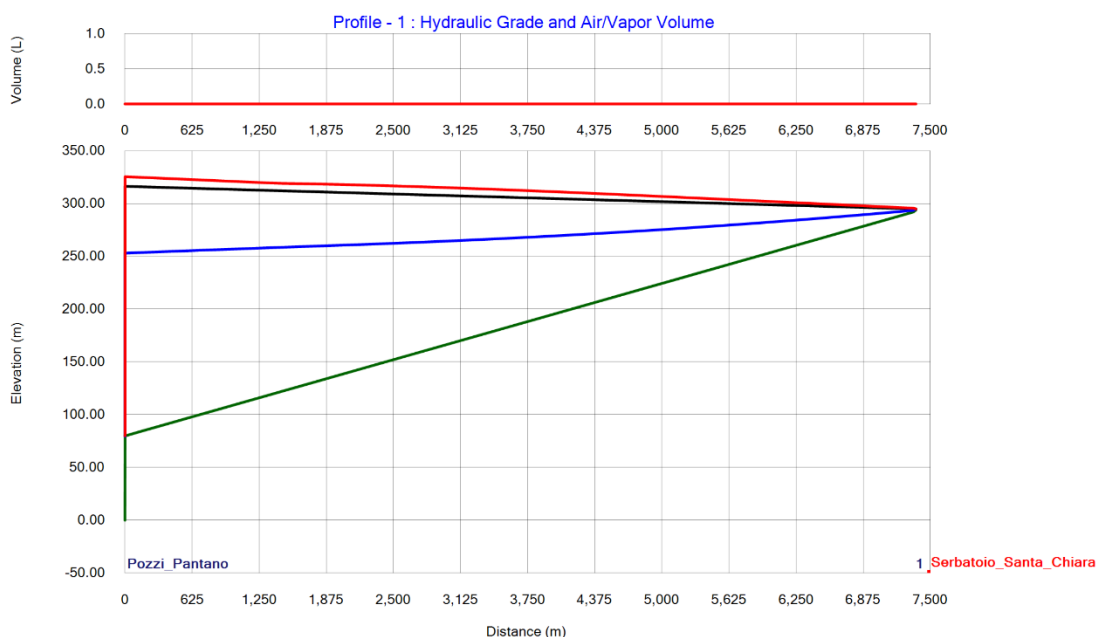


Fig. 7

## VIII. Pattern medi utilizzati

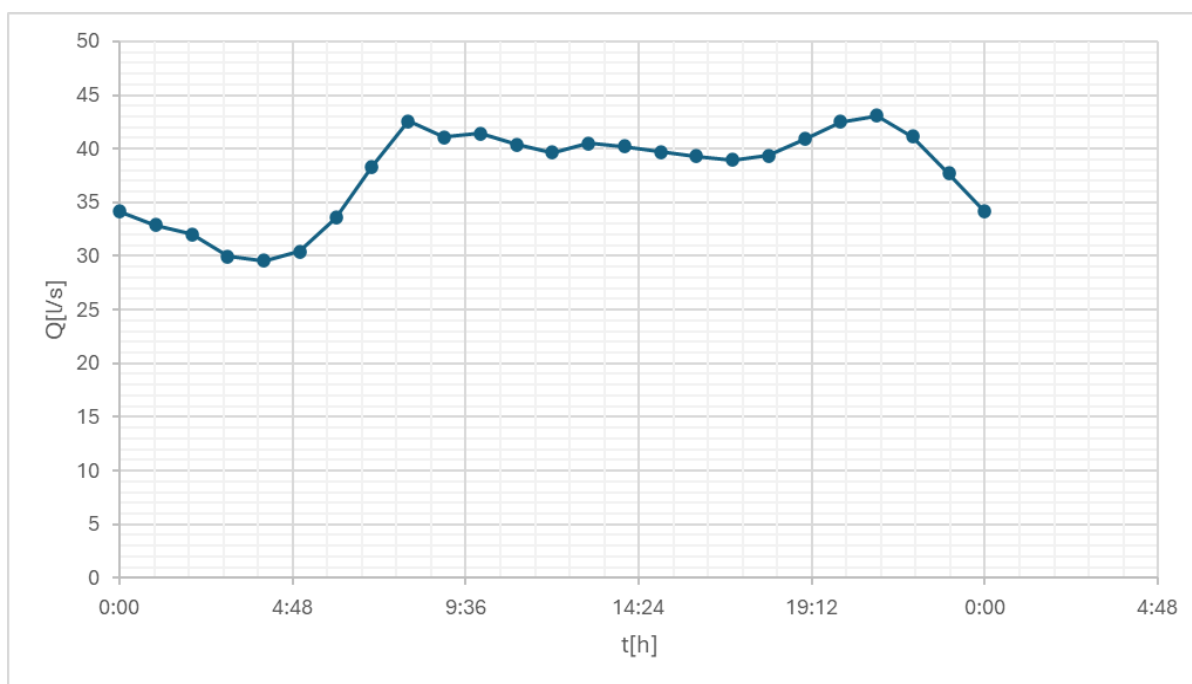
Il presente capitolo descrive e commenta i **pattern giornalieri medi di portata** adottati per il dimensionamento degli impianti di sollevamento in argomenti e che riguardano principalmente il serbatoio di **Santa Chiara**, distinti in funzione delle due principali direttrici di uscita:

- la distribuzione **a lungo e breve termine**,
- l'alimentazione verso il **partitore Monte Compatri**.

I pattern sono stati ricavati come andamenti medi orari su base giornaliera e rappresentano una schematizzazione del comportamento tipico del sistema, utile sia per analisi di esercizio sia per la modellazione idraulica.

### Pattern giornaliero in uscita a lungo e breve termine

Il grafico di seguito riportato mostra l'andamento della portata in uscita dal serbatoio verso le reti a lungo e breve termine. Le portate risultano comprese indicativamente tra **30 e 43 l/s**, con una variabilità giornaliera piuttosto marcata.



Pattern giornaliero da Serbatoio Santa Chiara in uscita a lungo e breve termine (verso Laghetto, Rete Colonna e Sant'Andrea).

Dal punto di vista temporale si osservano:

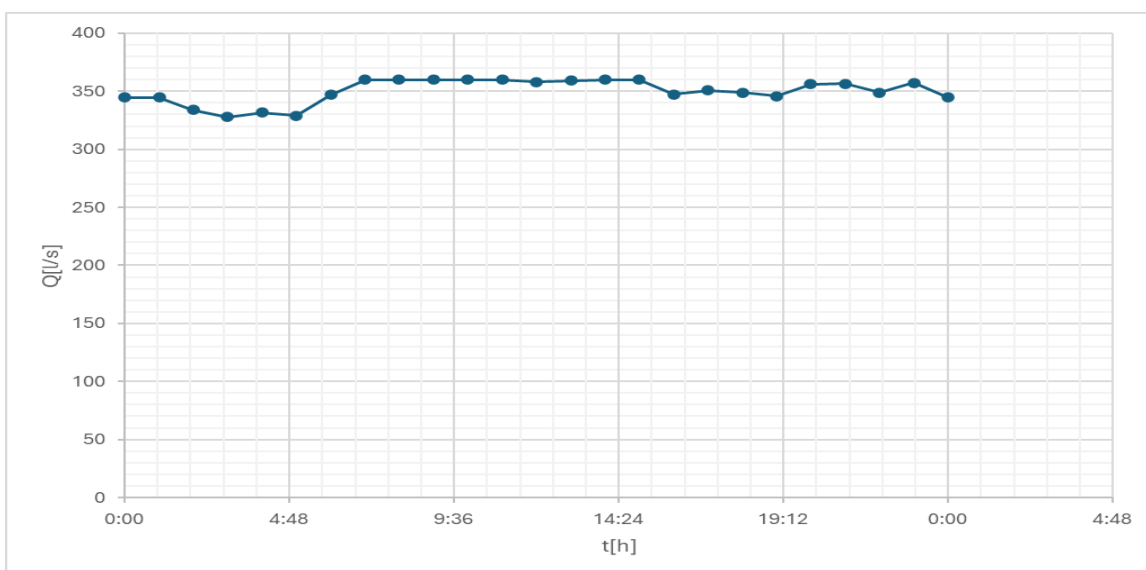
- **Valori minimi nelle ore notturne e di prima mattina**, indicativi di una riduzione della domanda, tipica delle utenze civili;
- **Un primo incremento significativo nelle ore mattutine**, associabile all'avvio delle attività quotidiane;
- **Una fase relativamente stabile durante le ore centrali della giornata**, con portate intorno ai 39–41 l/s;
- **Un secondo massimo nelle ore serali**, che rappresenta il picco giornaliero, seguito da una rapida diminuzione verso la fine della giornata.

Questo andamento evidenzia una **sensibilità diretta alla domanda dell'utenza finale**, rendendo il pattern particolarmente rilevante per:

- verifiche di capacità del serbatoio,
- analisi dei transitori di livello,
- simulazioni di esercizio in condizioni di punta.

#### Pattern giornaliero in uscita verso il partitore Monte Compatri

Il grafico di seguito riportato rappresenta invece il pattern di portata verso il partitore Monte Compatri, con valori decisamente più elevati e compresi indicativamente tra **330 e 360 l/s**. Rispetto al precedente, l'andamento risulta **molto più regolare e smorzato**.



Pattern giornaliero da Serbatoio Santa Chiara in uscita verso partitore Monte Compatri.

Gli aspetti principali sono:

- **Escursione giornaliera limitata**, con variazioni percentuali contenute;
- **Assenza di picchi pronunciati**, sia nelle ore mattutine sia in quelle serali;
- **Profilo quasi costante**, che suggerisce un funzionamento regolato o una domanda aggregata e poco sensibile alle oscillazioni orarie.

Questo comportamento è tipico di una **linea di alimentazione primaria o di trasferimento, che sopprime integralmente a quanto fornito dal campo pozzi della Doganella**, nella quale il serbatoio svolge un ruolo di compensazione, disaccoppiando le fluttuazioni della domanda a valle.