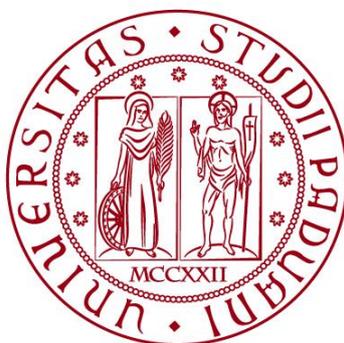


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE**  
*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



**TESI DI LAUREA**

**EMERGENZA PFAS: PROGETTAZIONE E  
COSTRUZIONE DI UN SERBATOIO A  
MONTAGNANA**

**Relatore: Ing. CLAUDIA ZOCCARATO**

**Laureanda: MARTINA ZONATO**

**ANNO ACCADEMICO 2023-2024**



# Sommario

<b>1.INTRODUZIONE .....</b>	<b>5</b>
1.1 Evoluzione dell'inquinamento ambientale: Il caso Mitene.....	5
1.2 Obiettivo.....	6
1.3 Inquadramento geografico .....	7
<b>2.PFAS.....</b>	<b>8</b>
2.1 Caratteristiche chimiche PFAS .....	8
2.2 Trattamenti per l'eliminazione dei PFAS dalle acque .....	8
2.3 Limiti di legge riguardanti i PFAS .....	9
2.4 Possibili effetti sulla salute umana e referti delle analisi personali .....	9
<b>3.CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEGLI ACQUEDOTTI.....</b>	<b>11</b>
3.1 Generalità .....	11
3.2 Rete di adduzione .....	12
3.3 Serbatoi .....	14
<b>4.PROGETTO ESECUTIVO: Estensione dello schema nell'area Monselice-Estense-Montagnanese.....</b>	<b>16</b>
4.1 Generalità .....	16
4.2 Analisi dei consumi idropotabili .....	16
4.3 Modellazione numerica a supporto della progettazione definitiva.....	17
4.4 Configurazione di "Progetto" (Variazione rete di adduzione).....	18
4.5 Serbatoio di Montagnana.....	20
<b>5.SOFTWARE UTILIZZATO.....</b>	<b>22</b>
5.1 Generalità EPANET 2.2 .....	22
5.2 Componenti EPANET 2.2 .....	22
<b>6.COSTRUZIONE DEL MODELLO .....</b>	<b>25</b>
6.1 Ricostruzione della rete di adduzione .....	25
6.2 Analisi di sensibilità sul modello .....	27
6.3 Analisi su serbatoio di Montagnana.....	37
<b>7.CONCLUSIONI .....</b>	<b>41</b>



# 1.INTRODUZIONE

## 1.1 Evoluzione dell'inquinamento ambientale: Il caso Miteni

Nel 2013 in Veneto si iniziò a parlare di PFAS, a seguito di uno studio condotto dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e il Ministero dell'Ambiente sui potenziali inquinanti nei fiumi italiani. La ricerca evidenziò la presenza di PFAS nelle acque sotterranee, in quelle superficiali e nell'acqua potabile, con un inquinamento particolarmente elevato nelle province di Vicenza, Padova e Verona. Successivamente, ebbe inizio uno dei più importanti processi per crimini ambientali in Italia: quindici ex dirigenti della Miteni, un'azienda con sede a Trissino (VI) che trattava composti fluorurati, sono stati accusati di aver provocato un grave disastro ambientale. Le accuse riguardarono la contaminazione di acque e terreni causata dagli scarti di lavorazione dell'azienda, che dal 1960 fino al suo fallimento nel 2013, ha continuato a riversare sostanze chimiche tossiche nell'ambiente.

È perciò plausibile che questo tipo di inquinamento si sia protratto nel tempo, almeno per una quarantina d'anni; infatti, la prima indicazione di un inquinamento delle falde da fluoruri attorno al sito. Rimar, oggi Miteni, viene fatta risalire intorno al 1977. Il 25 marzo 2013 furono misurate concentrazioni di PFAS totale superiore a 2000 ng/l.

L'area interessata dall'inquinamento è di circa 200 km<sup>2</sup> di territorio con circa 350.000 persone coinvolte nella contaminazione.

Il territorio interessato è stato suddiviso in zone in base al livello di esposizione alla contaminazione come illustrato in *figura 1.1*:

- Zona rossa: massima esposizione sanitaria,
- Zona arancione: captazione autonoma,
- Zona gialla: prestare attenzione,
- Zona verde: necessità di approfondimento.

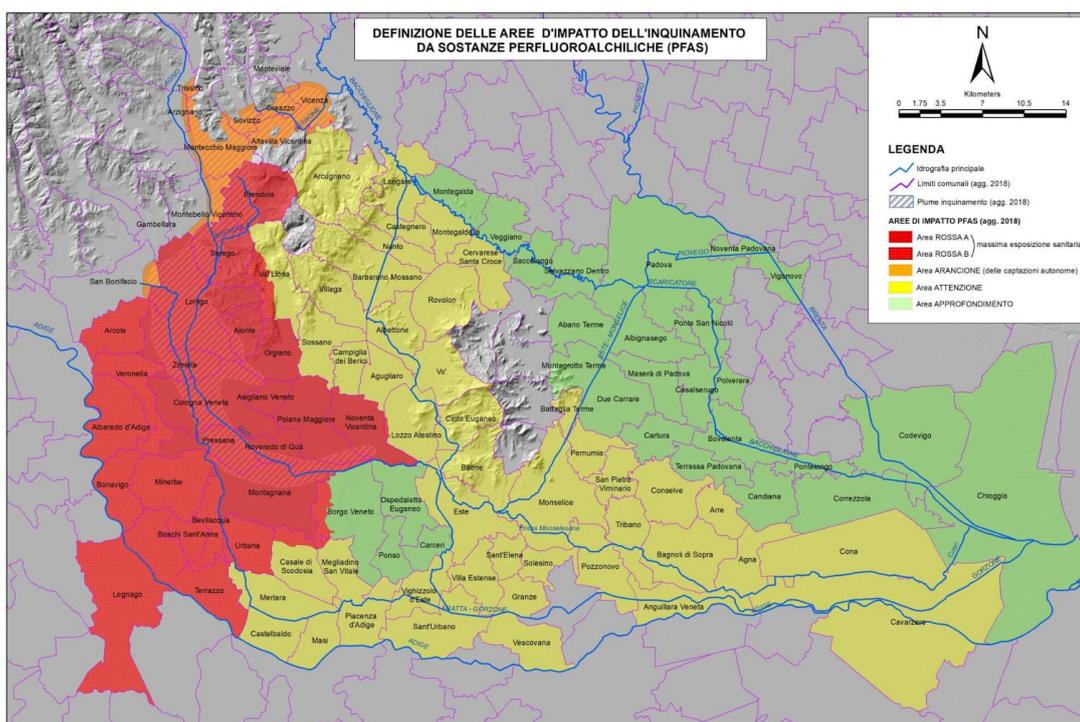


Figura 1.1: Definizione delle aree d'impatto da PFAS. Fonte: <https://www.legambienteveneto.it/inquinamento-da-pfas-il-territorio-interessato/>

Montagnana (PD) è tra i 21 comuni dell'area rossa, localizzati sopra il plume di contaminazione della falda sotterranea in cui le concentrazioni di PFAS nell'acqua superano i limiti di emergenza di 2000 ng/l. In seguito, si avviò un protocollo di sorveglianza sulla popolazione a rischio attraverso esami del sangue e delle urine con la ricerca di 12 diverse tipologie di PFAS.

## ***1.2 Obiettivo***

Nel 2013 non esistevano limiti legali per la presenza di PFAS nell'acqua potabile. Successivamente, furono avviate indagini e, in breve tempo, vennero installati filtri a carbone attivo, un sistema a costi elevati, negli impianti di trattamento dell'acqua, al fine di ridurre la concentrazione in conformità con le indicazioni del Ministero della Salute (30 ng/l per i PFOA, 30 ng/l per i PFOS e 500 ng/l totali per gli altri PFAS).

Acquevenete ha investito 33 milioni di euro per riuscire a far fronte all'inquinamento, l'obbiettivo fu quello di cambiare la fonte di approvvigionamento per consentire ai cittadini l'uso di un'acqua incontaminata. A tal fine, fu progettata una maxi-condotta che collega Ponso, Montagnana e Pojana Maggiore, una tubazione che percorre 22 km e alimenta un nuovo serbatoio di accumulo da 10.000 mc situato a Montagnana. Questo progetto permise di abbandonare la fornitura di acqua proveniente da Almisano di Lonigo, sito contaminato, per utilizzare acqua incontaminata proveniente da Camazzole nel territorio di Carmignano del Brenta.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è di descrivere come è stata affrontata l'emergenza PFAS e di eseguire alcune simulazioni numeriche della rete di adduzione modificata con l'introduzione del nuovo serbatoio di Montagnana.

### 1.3 Inquadramento geografico

L'inquadramento geografico riveste un'importanza cruciale in una tesi che analizza come è stata affrontata l'emergenza PFAS. Comprendere la distribuzione geografica degli inquinanti non solo consente di identificare le aree più colpite, ma facilita anche l'individuazione delle vie di diffusione e delle possibili fonti di contaminazione. Una visione geografica completa del territorio è fondamentale per valutare l'impatto dell'inquinamento sull'ecosistema e sulla salute umana.

L'acqua, insieme al suolo e all'aria, è uno degli elementi più suscettibili alla contaminazione. Pertanto, è essenziale tracciare il percorso che essa compie nel territorio, tenendo conto di fattori come la topografia, le caratteristiche idrologiche e i modelli di uso del suolo.

Nella *figura 1.2* vengono specificati i principali siti di interesse al presente studio.

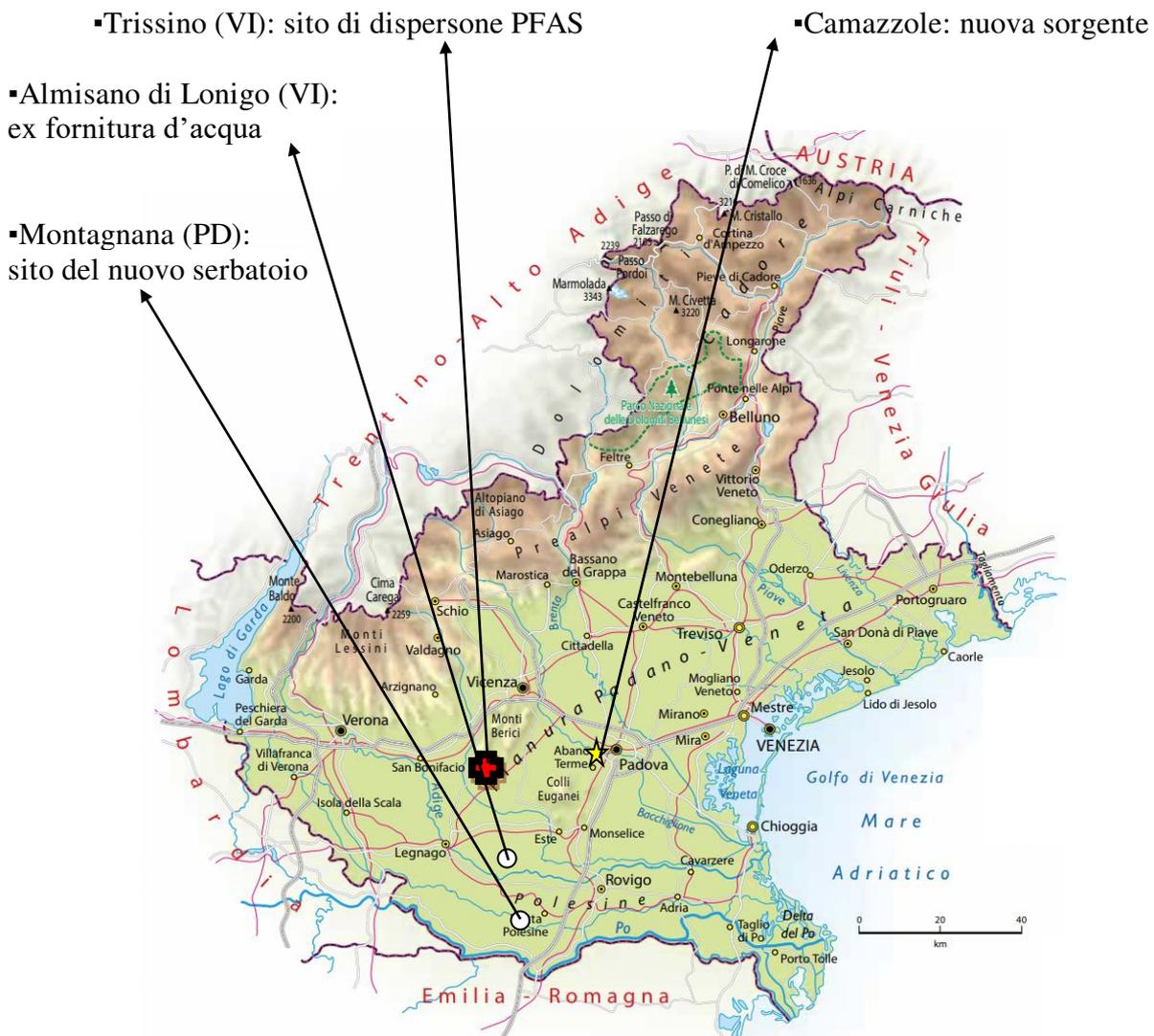


Figura 2: Carta oro-idrografica del Veneto con indicazioni dei siti di interesse al presente studio

## 2.PFAS

### 2.1 Caratteristiche chimiche PFAS

L'acronimo PFAS corrisponde a Sostanze Perfluoro Alchiliche, costituite da catene idrofobiche fluorurate di varia lunghezza. Essi si caratterizzano per una particolare stabilità termica grazie alla loro struttura chimica che gli conferisce inoltre elevata resistenza ai processi naturali di degradazione.

In campo industriale e commerciale gli acidi perfluorurati più diffusi e utilizzati sono l'acido perfluorottanoico (PFOA) e l'acido perfluorottanosulfonato (PFOS); in *figura 2.1* è stata riportata la struttura chimica di tali sostanze.

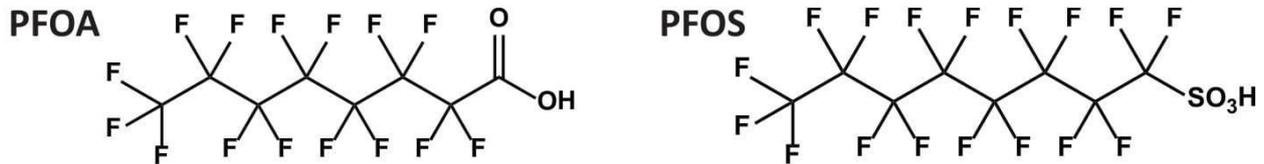


Figura 2.1: Struttura chimica degli acidi PFOA e PFOS. Fonte: <https://www.legambienteveneto.it/pfas-cosa-sono-e-come-incidono-sulla-salute-delluomo/>

Queste sostanze sono persistenti e tendono ad accumularsi non solo nell'ambiente ma anche negli organismi viventi dove risultano essere tossici ad elevate concentrazioni.

Grazie alle loro proprietà idrofobiche, i PFAS vengono impiegati per conferire ai prodotti un'impermeabilità efficace verso acqua e grassi. Negli anni '50 sono stati importati in Italia e utilizzati in una vasta gamma di prodotti, tra cui impermeabilizzanti per tessuti, tappeti, pelli, insetticidi, schiume antincendio, vernici; ma particolarmente noti per il rivestimento antiaderente delle pentole da cucina e per la produzione di tessuti tecnici.

### 2.2 Trattamenti per l'eliminazione dei PFAS dalle acque

Attualmente, il metodo più efficace per eliminare le sostanze perfluoroalchiliche dall'acqua è la filtrazione attraverso carboni attivi. Si tratta di un processo chimico-fisico dove le molecole di una sostanza, adsorbato ossia l'inquinante, si fissano ad una superficie solida porosa, adsorbente. L'adsorbimento che si forma in questo caso è di tipo fisico: avviene una condensazione molecolare dell'adsorbato nei pori capillari della superficie del solido. Il materiale poroso utilizzato è il carbone attivo in forma granulare (GAC). Questo materiale è costituito da una serie di microcristalli di grafite, prodotti da materiali ad alto contenuto di carbonio. Il carbone attivo è noto per avere elevata superficie specifica e un ampio spettro di sostanze con cui può interagire.

Presso la centrale di Almisano di Lonigo dove le acque risultavano a elevata concentrazione di PFAS è stato adottato un sistema di filtrazione che sfrutta l'adsorbimento su carboni attivi granulari di origine minerale. I tipi di carbone attivo utilizzati sono stati selezionati per la loro efficacia, sulla base di studi condotti sul campo da Acquevenete. Per garantire il mantenimento degli standard di qualità del trattamento, vengono effettuate analisi settimanali sia all'ingresso che all'uscita della filtrazione. La sostituzione del carbone attivo viene pianificata in base all'analisi della sua capacità di rimuovere i PFAS, e avviene quando i filtri iniziano a mostrare segni di saturazione. Il carbone esausto viene completamente sostituito con altro materiale mentre il carbone utilizzato viene gestito da aziende autorizzate e smaltito in strutture apposite.

## ***2.3 Limiti di legge riguardanti i PFAS***

Il provvedimento emesso dalla Giunta Regionale del Veneto, identificato come Delibera 1590 del 3 ottobre 2017, ha fissato dei limiti specifici per le sostanze perfluoroalchiliche (PFAS) nelle acque potabili. I valori definiti sono i seguenti: la somma di PFOA e PFOS deve essere pari o inferiore a 90 ng/l, mentre il limite per PFOS singolarmente non deve superare i 30 ng/l. Inoltre, per altre tipologie di PFAS è previsto un valore massimo di 300 ng/l.

Per i comuni inclusi nell'Area di Massima Esposizione Sanitaria (zona rossa), la DGR 1591/2017 ha imposto un ulteriore stringente requisito: entro un intervallo di sei mesi, i livelli di PFOA e PFOS combinati dovranno scendere a 40 ng/l o meno. Questo obiettivo deve essere raggiunto tramite l'implementazione di diverse strategie e tecnologie di trattamento, progettate per ridurre l'inquinamento delle acque destinate al consumo umano.

## ***2.4 Possibili effetti sulla salute umana e referti delle analisi personali***

La capacità di bioaccumulo dei PFAS negli organismi viventi comporta un incremento della loro concentrazione man mano che si prosegue lungo la catena alimentare. L'esposizione umana ai PFAS avviene principalmente attraverso l'alimentazione, ma anche per inalazione e ingestione di polveri contaminate. Una volta rilasciati nell'ambiente, questi composti nocivi entrano nella catena alimentare tramite il suolo, la vegetazione, le coltivazioni e gli animali, fino a raggiungere gli alimenti.

PFOA e PFOS, due tra i più noti PFAS, possono provocare diversi effetti negativi avendo la capacità di accumularsi nell'organismo. In ambito medico, i PFAS sono classificati come interferenti endocrini; la loro presenza può alterare vari processi biologici legati agli ormoni, influenzando lo sviluppo, il comportamento, la fertilità e altre funzioni cellulari essenziali.

Tra le patologie frequentemente associate a un'esposizione prolungata ai PFAS si registrano tumori renali, cancro ai testicoli, disturbi della tiroide, ipertensione in gravidanza, colite ulcerosa, aumento del colesterolo e molte altre condizioni di salute. Sostanze come il PFOA e il PFOS hanno dimostrato di interferire con la comunicazione intercellulare, un processo cruciale per la crescita e la divisione cellulare, aumentando così il rischio di sviluppo di neoplasie, in particolare in situazioni di esposizione cronica.

Recenti studi hanno evidenziato un aumento delle patologie neonatali e delle complicanze durante la gravidanza nelle aree più contaminate. Tra le condizioni riscontrate, si segnalano il diabete gestazionale, la nascita di neonati con peso inferiore alla media e malformazioni congenite significative, inclusi disturbi del sistema nervoso centrale, del sistema circolatorio e anomalie cromosomiche.

Nonostante le evidenze emergano, risultano necessari ulteriori studi per confermare in modo definitivo la correlazione diretta tra l'esposizione a queste sostanze e le patologie menzionate.

A seguito dell'accaduto, è stato attivato un protocollo di sorveglianza che comprende un insieme di procedure destinate a monitorare e raccogliere dati sull'evento. Questo strumento si rivela fondamentale per la raccolta sistematica delle informazioni, consentendo una comprensione più approfondita del fenomeno e facilitando una gestione più efficace delle problematiche emerse.

Il protocollo applicato include un'intervista per individuare abitudini di vita non salutari e fornire informazioni e consigli su come proteggere la propria salute; la misurazione della pressione, esami del sangue e delle urine per valutare lo stato di salute di fegato, reni e tiroide, e l'eventuale presenza di alterazioni del metabolismo dei grassi e degli zuccheri; con la ricerca di 12 diverse tipologie di PFAS nel siero.

In *figura 2.2- 2.3-2.4* si può osservare la variazione nel tempo delle sostanze presenti nel sangue di un soggetto residente in una zona rossa, specificamente a Montagnana. Il soggetto in questione ha

utilizzato l'acqua dell'acquedotto per tutte le attività quotidiane, quali la preparazione dei pasti, l'irrigazione dell'orto e le pratiche di igiene personale. Tuttavia, è importante sottolineare che non ha mai impiegato tale acqua per scopi di idratazione.

acido perfluorobutanoico(PFBA): 0 ng/ml  
 acido perfluoropentanoico(PFPeA): 0 ng/ml  
 acido perfluoroesanoico(PFHxA): 0 ng/ml  
 acido perfluotoeptanoico(PFHpA): 0 ng/ml  
 acido perfluorooottanoico(PFOA): 64.2 ng/ml (v.n. 1,15-8,00)  
 acido perfluorononanoico(PFNA): 1.6ng/ml  
 acido perfluorodecanoico(PFDeA): 0 ng/ml  
 acido perfluoroundecanoico(PFUnA): 0.5 ng/ml  
 acido perfluorododecanoico(PFDoA): 0 ng/ml  
 perfluorobutansulfonato(PFBS): 0 ng/ml  
 perfluoroesansulfonato(PFHxS): 4.1 ng/ml  
 perfluorooottansulfonato(PFOS): 2.6 ng/ml (v.n. 1,88-14,79)

Figura 2.2: Risultati screening del 29/05/2018

Analisi	Valore rilevato	Valori di riferimento
acido perfluorobutanoico(PFBA)	0	
acido perfluoropentanoico(PFPeA)	0	
acido perfluoroesanoico(PFHxA)	0	
acido perfluotoeptanoico(PFHpA)	0	
acido perfluorooottanoico(PFOA)	* 24.6 ng/ml	0 - 8
acido perfluorononanoico(PFNA)	0.5	
acido perfluorodecanoico(PFDeA)	0	
acido perfluoroundecanoico(PFUnA)	0	
acido perfluorododecanoico(PFDoA)	0	
perfluorobutansulfonato(PFBS)	0	
perfluoroesansulfonato(PFHxS)	2	
perfluorooottansulfonato(PFOS)	1.7 ng/ml	0 - 14.79

Figura 2.3: Risultati screening del 09/02/2020

Analisi	Valore rilevato	Valori di riferimento
acido perfluorobutanoico(PFBA)	0	
acido perfluoropentanoico(PFPeA)	0	
acido perfluoroesanoico(PFHxA)	0	
acido perfluotoeptanoico(PFHpA)	0	
acido perfluorooottanoico(PFOA)	* 12.2 ng/ml	0 - 8
acido perfluorononanoico(PFNA)	0	
acido perfluorodecanoico(PFDeA)	0	
acido perfluoroundecanoico(PFUnA)	0	
acido perfluorododecanoico(PFDoA)	0	
perfluorobutansulfonato(PFBS)	0	
perfluoroesansulfonato(PFHxS)	1.4	
perfluorooottansulfonato(PFOS)	1.3 ng/ml	0 - 14.79

Figura 2.3: Risultati screening del 06/10/2024

## 3.CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEGLI ACQUEDOTTI

### 3.1 Generalità

Un acquedotto è un'opera idraulica composta da diverse componenti, ognuna delle quali deve essere dimensionata singolarmente e successivamente verificate nel loro insieme. Le parti in cui si suddivide un acquedotto comprendono:

- la rete di adduzione, il cui compito è quello di trasportare l'acqua dalla fonte di approvvigionamento alla zona di distribuzione;
- la rete di distribuzione, responsabile della fornitura d'acqua ai singoli utenti all'interno dell'area di utilizzo;
- le opere di presa, di regolazione, di sollevamento e di trattamento delle acque.

Ciascuna di queste opere viene progettata autonomamente, ma poiché esse interagiscono costantemente tra loro, la progettazione deve essere affrontata con una visione globale. Il primo passo per ogni sistema idrico consiste nell'identificazione delle fonti di approvvigionamento, che possono variare (acque sotterranee, laghi, dighe, fiumi) e il cui utilizzo deve essere valutato in relazione alla quantità e alla qualità dell'acqua disponibile. Ogni acquedotto è progettato per avere una vita utile di 50-100 anni, il che richiede analisi statistiche per prevedere lo sviluppo demografico e economico della zona urbana, al fine di dimensionare il sistema non solo per le esigenze attuali, ma anche per quelle future sul lungo termine; in questo modo si può valutare la reale capacità di una fonte di approvvigionamento di soddisfare le richieste degli utenti. È fondamentale inoltre considerare la qualità dell'acqua, poiché quella destinata al consumo umano deve rispettare specifiche normative vigenti.

Una particolare attenzione deve essere prestata al posizionamento e alle dimensioni dei serbatoi situati tra la rete di adduzione e quella di distribuzione, o all'interno della rete di distribuzione stessa, per regolare il flusso e garantire un servizio efficiente, capace di soddisfare le esigenze degli utenti in qualsiasi momento della giornata.

Una volta identificate le fonti di approvvigionamento e definiti i punti in cui collocare i serbatoi, è possibile procedere con la progettazione della rete di adduzione. Di norma, negli acquedotti, le condotte dell'acqua sono realizzate in pressione per garantire la sicurezza igienica dell'acqua, in caso di rottura l'acqua fuoriesce dalla tubazione e niente può entrare al suo interno. Si vanno a posare le condotte lungo percorsi facilmente accessibili, come strade e sentieri, per ridurre i costi di cantiere e facilitare l'accesso ai mezzi e al personale sia durante la costruzione che nelle successive fasi di manutenzione.

L'ultima fase della progettazione di un sistema di approvvigionamento idrico è la definizione e il dimensionamento della rete di distribuzione. Analizzando l'altimetria del territorio che si intende servire, si dovrà valutare se adottare una sola rete di distribuzione o più reti a diversi livelli piezometrici.

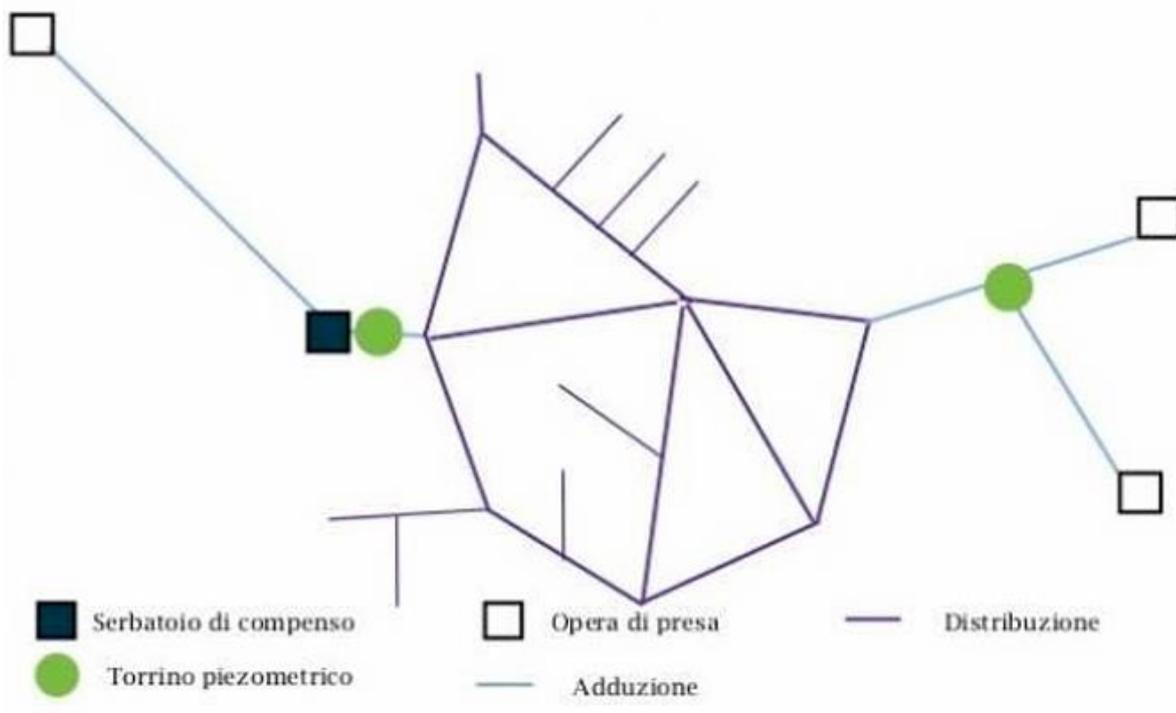


Figura 3.1: Topologia di un sistema di approvvigionamento idrico. Fonte: Da Deppo et al., 2011

### 3.2 Rete di adduzione

La rete di adduzione ha la funzione di trasportare l'acqua dall'impianto di presa ai punti di utilizzo. Per "luogo di utilizzo" si intende un serbatoio di compenso, che rappresenta il termine della rete di adduzione. Tra l'opera di presa e questo serbatoio, di solito, è presente un impianto di potabilizzazione.

La condotta di adduzione può avere diversi schemi di deflusso:

- gravità: questa modalità è caratterizzata dalla presenza di una differenza di carico piezometrico nel sistema, con l'opera di presa situata a un livello superiore rispetto al serbatoio di compenso.
- a sollevamento: in questa modalità, la differenza di carico piezometrico non è sufficiente a consentire il movimento dell'acqua tramite gravità; pertanto, si aggiunge energia dall'esterno attraverso un impianto di sollevamento.

Il dimensionamento della condotta avviene tenendo conto della portata media nel giorno di massimo consumo, mentre la regolazione delle variazioni orarie è compito del serbatoio di compenso. Fattori da tenere in considerazione nella progettazione sono: distanza dalla fonte, portata da trasportare e caratteristiche del terreno (roccioso, franoso, cedevole, acquitrinosi, aggressivi). Inoltre, bisogna cercare di evitare elevate pressioni interne di esercizio altrimenti si deve ricorrere all'utilizzo di condotte con maggiore spessore.

Esistono due schemi idraulici generali per una rete di adduzione. Il primo consiste in una condotta semplice, ossia un'unica tubazione che collega l'opera di presa al serbatoio di compenso. Il secondo, noto come acquedotto consortile, è composto da una condotta principale di dimensioni maggiori che collega l'opera di presa al serbatoio di compenso del centro abitato più significativo, insieme a una serie di condotte di derivazione più piccole che si diramano da quella principale per servire i serbatoi di compenso dei centri abitati minori.

La realizzazione di un acquedotto consortile risulta indubbiamente più vantaggiosa rispetto a molteplici acquedotti individuali, sia in termini economici sia per quanto riguarda la gestione e la manutenzione, anche se comporta maggiore complessità in fase di progettazione. Questa soluzione si adotta quando un'unica opera di presa è destinata a fornire acqua a più centri abitati.

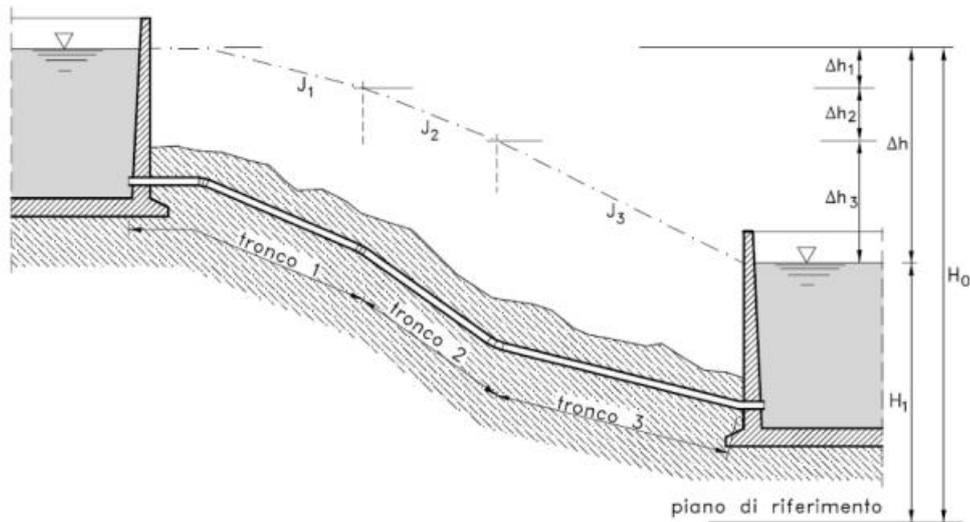


Figura 3.2: Condotta semplice a gravità. Fonte: Da Deppo et al., 2011

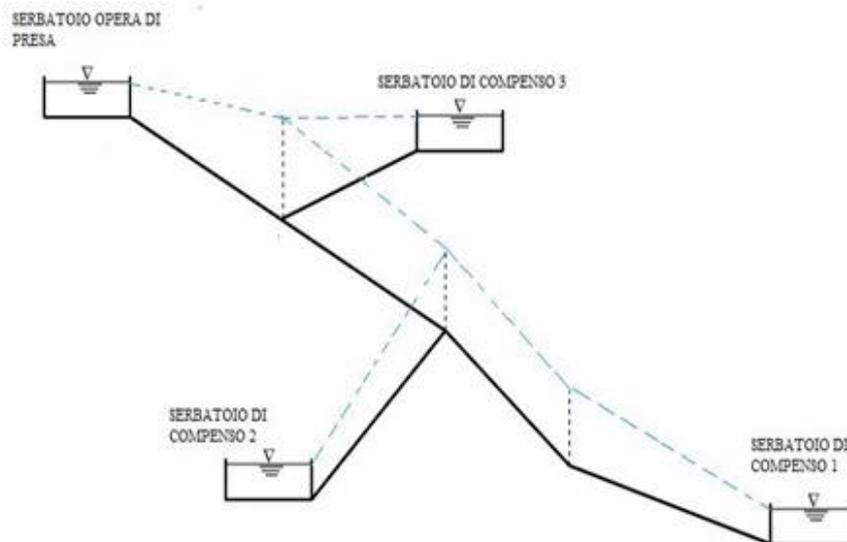


Figura 3.3: Condotta consortile. Fonte: Da Deppo et al., 2011

Nella figura 3.2 e figura 3.3 sono rappresentati gli andamenti delle condotte con la loro rispettiva linea piezometrica.

La linea piezometrica rappresenta l'altezza fino alla quale l'acqua salirebbe in un tubo piezometrico connesso a un punto del sistema. In altre parole, indica la pressione idraulica in un determinato punto. Essa viene tracciata collegando i punti in cui l'acqua raggiunge il suo livello nella tubazione piezometrica.

Le condotte vengono posate all'interno di trincee scavate nel terreno, al fine di proteggerle da possibili agenti inquinanti e distribuire in modo più uniforme i carichi superiori, riducendo così le pressioni sulle strutture. È fondamentale che le condotte siano posizionate a una profondità

adeguata a garantire una corretta distribuzione del peso; normalmente, questa profondità varia tra 1 m e 1,2 m, offrendo così anche un buon isolamento termico. I materiali più utilizzati per la realizzazione di una condotta sono la ghisa e l'acciaio ed i materiali plastici come il polietilene, il polipropilene e la vetroresina.

Dopo aver stabilito il profilo altimetrico e planimetrico del percorso, è possibile procedere con la dimensione della condotta/e d'adduzione. Per avviare questo processo, è fondamentale prima chiarire il funzionamento della rete: se opera a gravità o attraverso un sistema di pompaggio, in quanto le tecniche di analisi variano in base a questa distinzione.

### **3.3 Serbatoi**

I serbatoi urbani rivestono un ruolo fondamentale all'interno degli acquedotti, grazie alla loro capacità di svolgere diverse funzioni essenziali:

- **compenso:** essi consentono di mantenere un regime delle portate in uscita (deflussi) differente rispetto a quello delle portate in entrata (afflussi).
- **riserva:** questi serbatoi garantiscono la continuità del deflusso a valle, evitando interruzioni in caso di inattività della tubazione a monte (condotta adduttrice) dovute a rotture, guasti delle apparecchiature o assenza di energia elettrica necessaria per il funzionamento delle pompe. Inoltre, garantisce servizio antincendio, offrono una fonte d'acqua pronta all'uso in caso di emergenze legate agli incendi.

Ogni funzione è associata a un volume d'acqua specifico, che deve essere calcolato in modo dettagliato. Tra questi, il volume più cruciale è senza dubbio quello destinato alla funzione di compenso.

La condotta d'adduzione alimenta il serbatoio con una portata costante, mentre il flusso in uscita varia nel tempo in base alla richiesta idrica della rete di distribuzione, che a sua volta riflette le esigenze degli utenti. Durante i periodi di elevato consumo, il serbatoio deve essere in grado di erogare una portata superiore alla media prevista, attingendo da una capacità di compenso dimensionata adeguatamente. È importante notare che il calcolo del compenso avviene su base giornaliera; un compenso su scala pluriennale o stagionale porterebbe ad accumuli eccessivi, richiedendo serbatoi di dimensioni non praticabili. Il livello del serbatoio passerà da un livello massimo in corrispondenza della fase di riempimento ad un livello minimo in corrispondenza della fase di svuotamento. Alle 24h, dato che il compenso è giornaliero, il livello del serbatoio sarà uguale a quello dell'ora 0 perché in caso contrario si avrebbe uno sfioro od uno svuotamento totale; questo è possibile nel caso in cui la portata entrante sia esattamente uguale alla portata uscente media. Il volume di compenso è tutto quello compreso tra il livello minimo e quello massimo che la risorsa presenta all'interno del serbatoio.

I serbatoi possono essere collocati prima del centro urbano da servire e in questo caso prendono il nome di serbatoi di testata, oppure dopo ed in tal caso prendono il nome di serbatoi d'estremità.

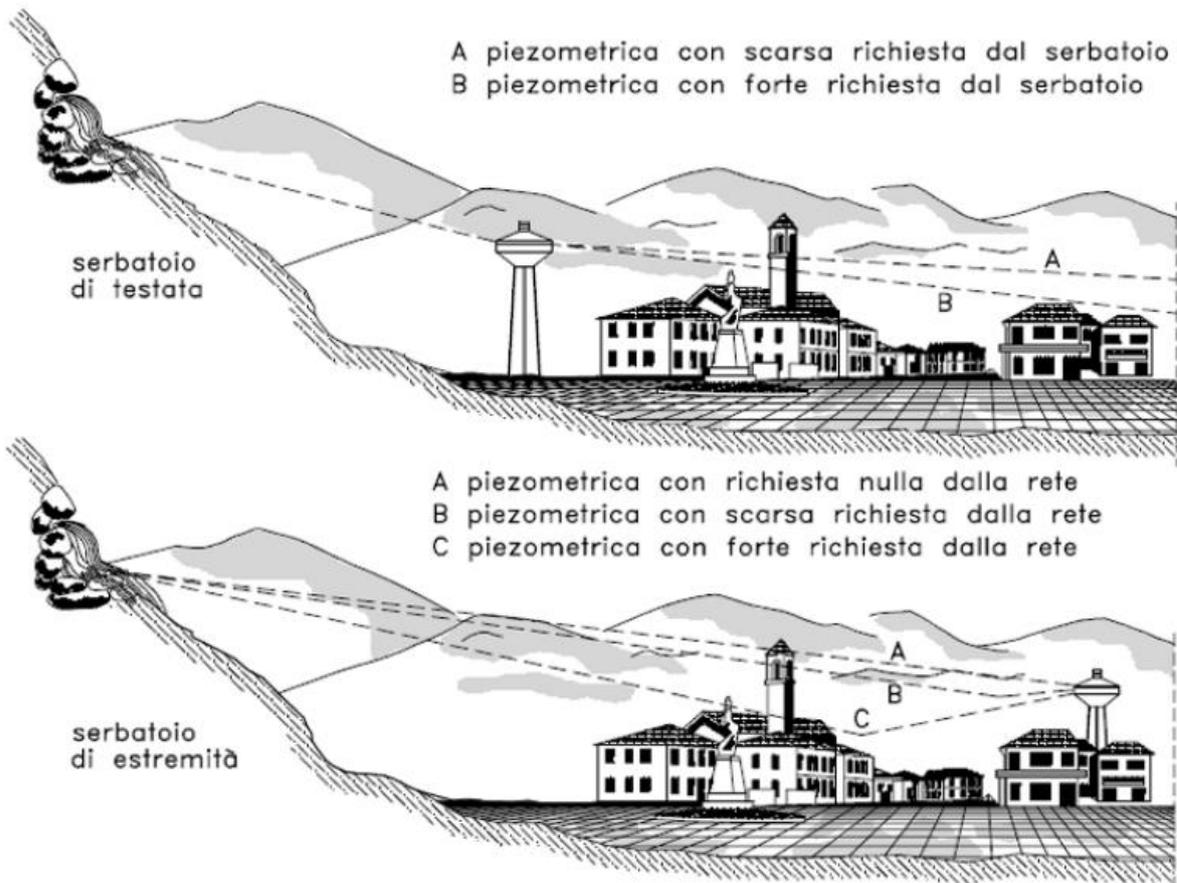


Figura 3.4: serbatoio di testata e di estremità. Fonte: Da Deppo et al., 2011

Esistono varie tipologie costruttive dei serbatoi ma le tre fondamentali risultano (figura 3.5):

- serbatoio a terra (interrati o in caverna);
- serbatoi sopraelevati o pensili;
- serbatoi a terra con vasca pensile o torrino piezometrico o autoclave.

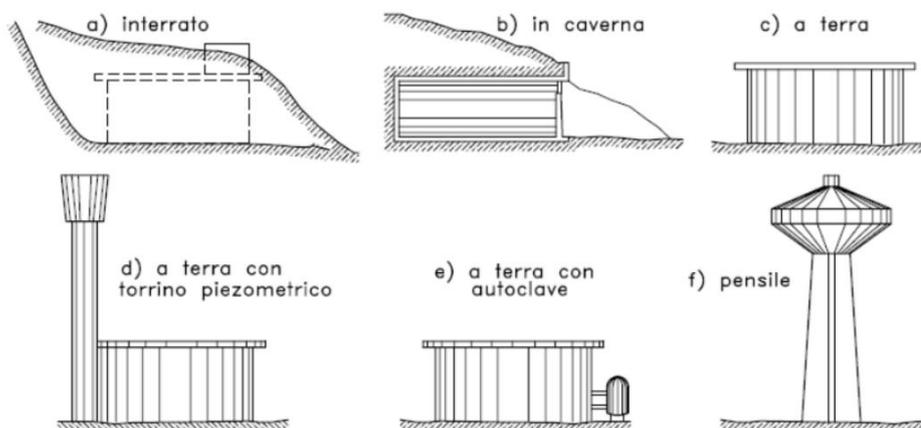


Figura 3.5: tipologie costruttive serbatoi. Fonte: Da Deppo et al., 2011

## **4.PROGETTO ESECUTIVO: Estensione dello schema nell'area Monselice- Estense-Montagnanese**

### ***4.1 Generalità***

Nel presente lavoro di tesi è stato analizzato il progetto esecutivo condotto da Acquevenete che illustra la risposta per fornire acqua di qualità ai residenti di Montagnana e dei comuni vicentini dell'area berica, attualmente coinvolti nell'emergenza PFAS. Nel comune di Carmignano di Brenta si trova un nodo strategico per l'approvvigionamento idrico della parte meridionale del Veneto. Questo è reso possibile attraverso i sistemi acquedottistici che fanno parte del più ampio sistema degli acquedotti veneti, conosciuto come MO.S.A.V. (Modello Strutturale degli Acquedotti del Veneto). Questo modello rappresenta un approccio integrato alla pianificazione e gestione degli acquedotti, delineando le principali strutture necessarie per garantire un adeguato approvvigionamento di acqua potabile su tutto il territorio regionale.

Il progetto prevede l'uso di un rilevante campo pozzi situato a Camazzole nel fiume Brenta, riconosciuto per il suo alto valore ambientale e per l'eccellente qualità dell'acqua che vi scaturisce. Da tale località, una condotta di grande diametro, di proprietà di Acquevenete ed ETRA, si estende lungo la dorsale che attraversa Carmignano di Brenta, Padova Ovest, Monselice e Ponso, collegando idraulicamente le fonti pedemontane alla bassa padovana.

Grazie ai fondi messi a disposizione dalla Presidenza del Consiglio dei ministri e attraverso la Regione Veneto, Acquevenete ha realizzato un ampliamento del sistema idrico con una nuova condotta adduttrice di 600 mm di diametro, che segue il percorso Ponso-Montagnana-Poiana Maggiore, oltre a costruire un nuovo serbatoio a Montagnana, dalla capacità di 10.000 m<sup>3</sup>, suddiviso in due moduli da 5.000 m<sup>3</sup>, dotati di una centrale di pompaggio.

Da monte verso valle si presentano in ordine le seguenti opere idrauliche: l'opera di presa a Camazzole (fonte), il rilancio di Taggi, il serbatoio di Solana, il serbatoio di Montagnana in progetto e il serbatoio di Montagnana esistente per poi collegarsi al serbatoio di Pojana già esistente.

Di seguito vengono presentati i punti chiave utilizzati per l'elaborazione di questa tesi, estratti dalla relazione idraulica di dimensionamento realizzata da Acquevenete.

### ***4.2 Analisi dei consumi idropotabili***

Per definire le portate di progetto relative ai consumi idropotabili da applicare ai punti di consegna della rete di adduzione oggetto di studio, è stata condotta un'analisi basata sui dati di monitoraggio forniti da ETRA e Acquevenete.

I dati di monitoraggio consistono in serie temporali registrate in punti strategici della rete di adduzione, nei quali sono state installate stazioni di misura. Queste stazioni tracciano l'andamento delle portate, delle pressioni e dei livelli idrici, variando in base alla tipologia dei singoli punti osservati nella rete.

Al fine di determinare il valore di portata associato al giorno di massimo consumo è stata preliminarmente ricercata, sulla base dei dati di monitoraggio dell'intero anno, la settimana di massimo consumo per ogni serie di misura e successivamente è stato scelto il giorno della settimana (lunedì, martedì, ecc....) per il quale la somma dei valori medi giornalieri dei vari punti di derivazione è massima. Adottando questa metodologia, la settimana di riferimento non è stata costruita considerando i giorni di massimo consumo assoluti di ogni serie (approccio che avrebbero portato a generare una sovrastima dei consumi).

N° punto	Descrizione	Qg,max 2018 (l/s)	Qg,med 2018 (l/s)	N° punto	Descrizione	Qg,max 2018 (l/s)	Qg,med 2018 (l/s)
Etra 1	Piazzola	39.43	32.94	Montagnana	Montagnana Serbatoio	62.50	44.00
Etra 2	Limena	37.05	37.05	Pojana	Pojana Serbatoio 1	16.50	11.64
Etra 3	Bindelle	93.46	74.11	Noventa V. 1	Noventa V. Derivazione rete	47.25	33.75
Etra 4	Palù	37.97	5.15	Noventa V. 2	Noventa V. Serbatoio	5.25	3.75
Etra 5	Scapacchiò	4.72	0.51	Cagnano	Pojana Serbatoio 2	10.00	7.06
Etra 6	Circuito Montero	114.25	114.25	Asigliano	Asigliano Serbatoio	6.50	4.60
Etra 7	San Daniele	63.82	63.82	Fornetto	Orgiano Derivazione rete	17.00	12.00
Etra 8	Catajo	10.29	10.29	Cori Alonte	Alonte Serbatoio	6.50	4.25
Etra 9	Battaglia Teme	16.24	13.38		<b>Tot. zona ovest</b>	<b>171.50</b>	<b>121.05</b>
<b>Totale ETRA</b>		<b>417.23</b>	<b>351.50</b>		Consumi esistenti	812.70	705.24
CVS 1	Via Tasso	67.24	47.89		<b>Tot. consumi</b>	<b>984.20</b>	<b>826.29</b>
CVS 2	Via Rivella	195.62	189.08				
CVS 4	Laghetti Este	132.61	116.77				
<b>Totale ex-CVS</b>		<b>395.47</b>	<b>353.74</b>				
<b>Totale generale</b>		<b>812.70</b>	<b>705.24</b>				

Figura 4.1: Consumi medi annui e massimi consumi giornalieri. Fonte: progetto esecutivo Acquevenete

### 4.3 Modellazione numerica a supporto della progettazione definitiva

Per valutare la rete acquedottistica di adduzione esistente e il suo progetto di estensione, lo studio ingegneristico di Acquevenete ha condotto una modellazione numerica utilizzando i dati e gli studi preesistenti disponibili. Sono state effettuate simulazioni idrauliche attraverso un modello numerico basato sul codice di calcolo MIKE Urban del DHI.

Il modello numerico è stato messo a punto nell'ambito del precedente studio di fattibilità ed è stato aggiornato e integrato nella presente fase progettuale al fine di supportare il dimensionamento delle principali opere.

I dati di consumo idropotabile imposti nel modello numerico come condizioni al contorno sono stati determinati con riferimento ai due scenari alla base delle ipotesi di funzionamento ordinario e massimo del sistema acquedottistico studiato.

Con il modello idraulico messo a punto sono state condotte le seguenti attività:

- calibrazione e taratura del modello con riferimento ai dati del monitoraggio del 2018;
- SIM1: simulazione nella configurazione di "Stato Attuale" dello scenario di consumi medi (funzionamento ordinario);
- SIM2: simulazione nella configurazione di "Stato Attuale" dello scenario di consumi massimi (funzionamento limite);
- SIM3: simulazione nella configurazione di "Progetto" (estensione della rete) dello scenario di consumi medi (funzionamento ordinario);
- SIM4: simulazione nella configurazione di "Progetto" (estensione della rete) dello scenario di consumi massimi (funzionamento limite).

Si precisa che i risultati estratti dalle simulazioni si riferiscono alla condizione più favorevole delle prestazioni della stazione di pompaggio di Carmignano consentendo di fornire alla rete il massimo valore di concessione in termini di portata. Le simulazioni sono state eseguite, come già precisato, su un periodo di tempo esteso di durata settimanale in quanto ritenuto rappresentativo di un intero ciclo di riempimento e svuotamento dei serbatoi di rete.

La configurazione di progetto definitiva, in questa fase progettuale, è stata raggiunta tramite la verifica del corretto funzionamento e la calibrazione del modello idraulico nella configurazione di "Stato Attuale" sulla base dei dati relativi all'esercizio di Acquevenete e ETRA riferito al periodo 2018. Il modello è stato dunque implementato utilizzando le informazioni disponibili nel sistema informativo dei gestori: posizione geografica delle condotte e dei relativi vertici, diametri e materiale delle tubazioni.

La dorsale esistente è costituita da tubazioni in ghisa sferoidale ed in acciaio. La resistenza al moto varia da 0,2 a 2 mm in relazione alle tratte, al materiale utilizzato, all'età di posa ed alle risultanze della calibrazione matematica del modello idraulico sulle misure di portata e pressione lungo la linea.

Per quanto riguarda invece la rete di nuova realizzazione nell'ambito del presente progetto, trattandosi di tubazioni in ghisa sferoidale, si è scelto di utilizzare, a favore di sicurezza, il valore di 0,2 mm per tenere in giusta considerazione l'invecchiamento delle tubazioni. L'equazione utilizzata per la descrizione delle perdite di carico distribuite è quella di Darcy-Weisbach.

In riferimento alle perdite di carico concentrate ricorre, nel caso in questione, l'ipotesi di lunghe condotte. Il valore assunto da quest'ultime viene, pertanto, ritenuto trascurabile.

La rete acquedottistica oggetto di studio è alimentata dall'impianto di pompaggio di Carmignano costituito da 4 elettropompe a velocità variabile, di cui una di riserva. A Taggì, a valle dei due serbatoi a terra di compenso, è presente un ulteriore impianto di pompaggio con la funzione di rilanciare le portate immesse dalla centrale di Carmignano e costituito da 5 pompe (TP1, TP2, TP3, TP4, TP5), di cui una di riserva, tutte uguali tra loro.

#### **4.4 Configurazione di "Progetto" (Variazione rete di adduzione)**

Le simulazioni sono state effettuate per verificare la configurazione geometrica e funzionale del "Progetto" della rete, utile per la progettazione delle nuove opere, hanno consentito di comprendere il comportamento idraulico del sistema acquedottistico, condizionato dal funzionamento degli impianti di pompaggio, in particolare quelli di Carmignano e Taggì. L'impianto di sollevamento di Carmignano presenta elevata variabilità, con oscillazioni nelle portate massime e nelle pressioni in rete.

Il "Progetto" prevede l'estensione della rete per servire i comuni del territorio Montagnanese ed Estense. Inoltre, è prevista una stazione di pompaggio al serbatoio di Montagnana per rilanciare i volumi stoccati. La nuova unità di sollevamento di Montagnana deve sollevare circa 150 l/s con prevalenza di 60 m.

Rispetto alla configurazione esistente la geometria di progetto è stata così ulteriormente implementata:

- posa di una tubazione DN600 in ghisa dal nodo idraulico di Ponso al serbatoio di Progetto di Montagnana per circa 9 km;
- costruzione di due serbatoi a terra di capacità complessiva di 10.000 m<sup>3</sup> al nodo di progetto di Montagnana;
- collegamento della stazione di sollevamento di progetto al serbatoio esistente di Montagnana ed al nodo idraulico di Pojana mediante la posa di circa 11.7 km di tubazione in ghisa sferoidale DN600;

Per garantire il funzionamento dello schema idraulico in condizioni di progetto è stato necessario operare alcuni ulteriori perfezionamenti della rete esistente ossia si è effettuato un inserimento di un

sollevamento in linea aggiuntivo (booster) a monte del serbatoio di Solana: tale soluzione è vantaggiosa da un punto di vista delle pressioni in rete e del consumo energetico.

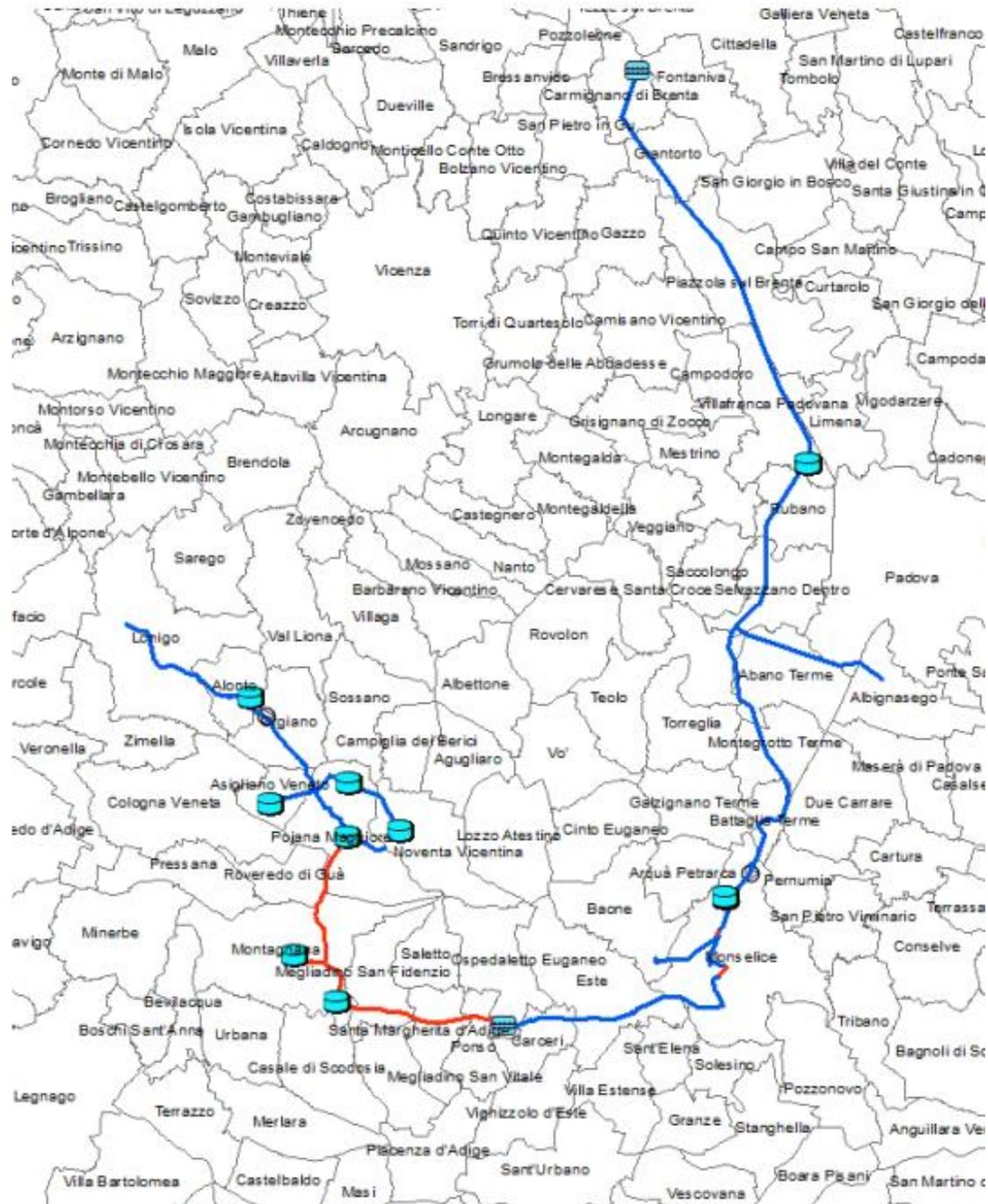


Figura 4.2: Schema idraulico dello scenario di progetto: in blu il sistema di adduzione esistente ed in rosso le opere di progetto. Fonte: progetto esecutivo Acquevenete

## 4.5 Serbatoio di Montagnana

Il progetto prevede la realizzazione del nuovo serbatoio strategico di Montagnana (2 moduli da 5.000 m<sup>3</sup> per un totale di 10.000 m<sup>3</sup>) con annessa centrale di pompaggio. Come già detto, questo serbatoio avrebbe il compito di immagazzinare le fonti disponibili in esubero per essere restituite in occasione dei picchi di idroesigenza alla rete in crisi da inquinamento PFAS.

	DESCRIZIONE	VALORE
<b>Montagnana PROGETTO</b>	Quota terreno (m slmm)	10
	Volume (m <sup>3</sup> )	10000
	Quota sfioro (m slmm)	15

Figura 4.3: Caratteristiche del serbatoio rappresentati nel modello numerico. Fonte: progetto esecutivo Acquevenete

Il serbatoio è costituito da due vasche circolari del diametro interno utile di 40 m, separate tra loro da una camera valvole di forma circa rettangolare e con dimensioni lungo gli assi principali pari a circa 44 m e 15 m. L'edificio nel suo complesso avrà una lunghezza massima, escluse le sistemazioni esterne di mascheramento, di circa 100 m ed una larghezza di 45 m. Le vasche saranno caratterizzate da un'altezza fuori terra di 7,0 m, mentre la struttura nel suo complesso, tra l'intradosso minimo della fondazione e la sommità del cornicione perimetrale, avrà un'altezza di 15,5 m. Le dimensioni interne delle vasche saranno invece 40 m di diametro, come già detto e un'altezza di 5,7 m.

In fase di progettazione è stata ridotta al minimo l'altezza fuori terra dell'opera sia approfondendola nel terreno anche al di sotto dell'ipotetico pelo libero della falda freatica, sia ampliando il più possibile l'impronta delle vasche di accumulo, riducendone quindi il tirante idrico all'interno, necessario per raggiungere i 10.000 m<sup>3</sup> di accumulo richiesti.

Sono stati adottati diversi accorgimenti per il mascheramento dei fronti e dei volumi del fabbricato, in particolare grazie all'utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica. Infatti, è stato possibile utilizzare rilevati realizzati con il terreno in esubero per il mascheramento delle pareti; si è scelto di utilizzare terre armate rinverdite, alternate a gabbionate con sassi spaccati posati a mano.



Figura 4.4: Render del serbatoio di Montagnana a seguito della realizzazione. Fonte: progetto esecutivo Acquevenete



Figura 4.5: Planimetria di progetto del serbatoio di Montagnana. Fonte: progetto esecutivo Acquevenete

La figura 4.6 illustra gli andamenti nel tempo del livello idrico del serbatoio in progetto riferendosi allo scenario dei consumi medi.

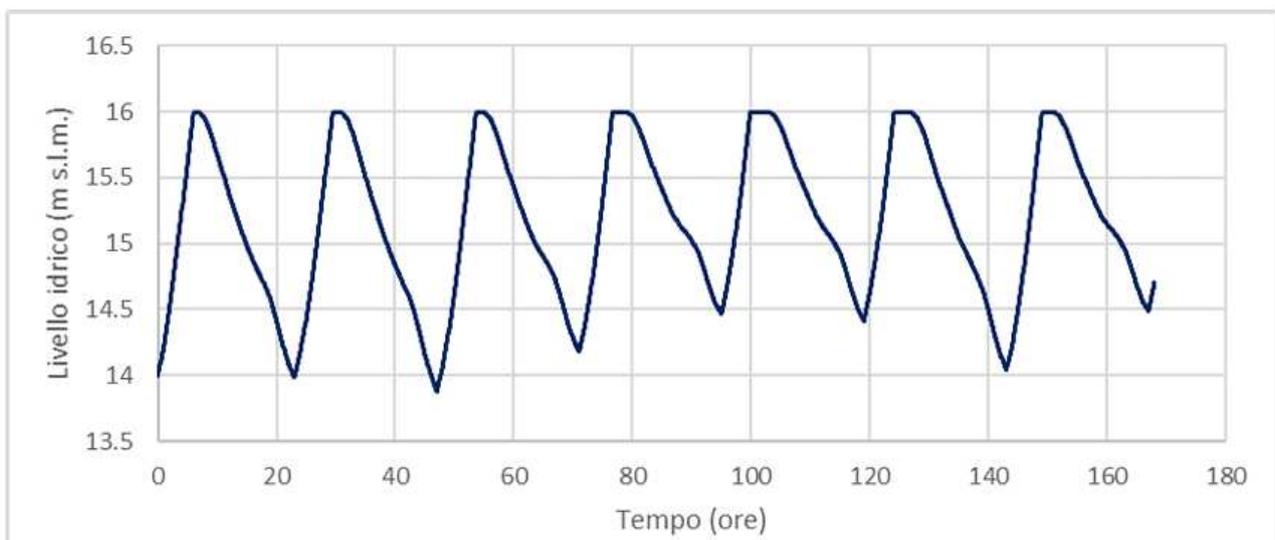


Figura 4.6: Andamento dei livelli idrici del serbatoio di Montagnana con consumi medi. Fonte: progetto esecutivo Acquevenete

I risultati della simulazione evidenziano che: il livello del serbatoio in progetto di Montagnana si mantiene stabile, mostrando fluttuazioni giornaliere di circa 2 m.

## 5.SOFTWARE UTILIZZATO

### 5.1 Generalità EPANET 2.2

Nella presente tesi è stato utilizzato il software EPANET 2.2: è un software di simulazione idraulica che è stato utilizzato nella fase di calibrazione e nella fase d'analisi della rete. Sviluppato dalla United States Environmental Protection Agency's (EPA) divisione Acquedotti e Risorse Idriche è ad oggi uno dei software più utilizzati nella verifica e nella progettazione di reti idriche in pressione. Con EPANET 2.2 si possono trattare sistemi di qualsiasi dimensione e complessità considerando tutti i vari elementi, anche quelli secondari, che è possibile trovare nella rete come, per esempio, le diverse tipologie di valvole o si può considerare una richiesta idrica variabile per ogni nodo.

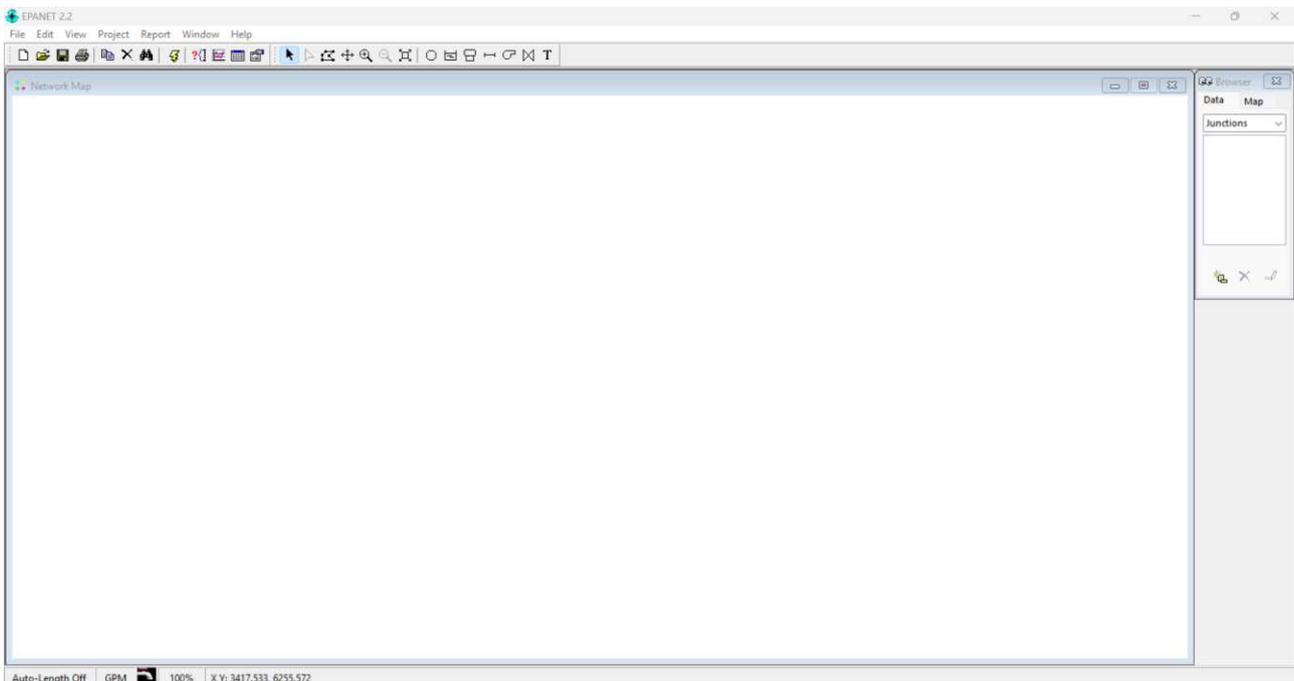


Figura 5.1: Interfaccia grafica EPANET 2.2.

### 5.2 Componenti EPANET 2.2

Si esamineranno i vari componenti presenti nel software EPANET 2.2, i quali consentono di convertire gli elementi fisici della rete idrica in rappresentazioni virtuali all'interno del programma di simulazione. Questo processo, dal punto di vista ingegneristico, è noto come modellazione. Con EPANET 2.2, è possibile modellare una rete idrica reale composta da condotte in pressione utilizzando gli oggetti che la formano e i loro relativi parametri operativi.

In particolare, la rete di approvvigionamento idrico è rappresentata come un insieme di collegamenti (detti “links”) che si interfacciano tramite nodi (denominati “nodes”).

I collegamenti possono includere:

- tubazioni,
- pompe,
- valvole.

I nodi di giunzione possono essere classificati in tre categorie:

- nodi di domanda, dove avviene il consumo di acqua,
- nodi sorgente, che rappresentano i punti di ingresso dell'acqua,
- nodi di immagazzinamento, come serbatoi o cisterne.

Questi costituiscono gli elementi fisici del sistema. Oltre a questi, vi sono anche elementi non fisici che comprendono:

- curve,
- andamenti temporali (time patterns).

Ciascun elemento fisico è caratterizzato da una serie di attributi che ne definiscono il comportamento. I nodi che rappresentano i punti della rete in cui i tubi si uniscono, senza avere immagazzinamento d'acqua, sono detti "junctions".

Per ciascun nodo, EPANET 2.2 richiede l'inserimento della domanda d'acqua e la quota altimetrica assoluta del terreno. Inoltre, è possibile assegnare a ogni nodo una variazione della portata erogata o entrante durante il periodo di simulazione tramite un "Demand Pattern", generato in EPANET 2.2 con l'ausilio dei cosiddetti "Time Patterns".

Al termine della simulazione, il programma calcola i valori di carico idraulico e di pressione nel nodo analizzato.

Un'altra tipologia di nodi di giunzione è rappresentata da serbatoi e cisterne, che costituiscono i punti di immagazzinamento dell'acqua. In tali punti, si ha una superficie libera, determinando un valore costante di carico piezometrico. I serbatoi ("Tanks") e le cisterne ("Reservoirs") si differenziano per il comportamento del livello dell'acqua; nei serbatoi, il livello varia in base alla differenza tra la portata entrante e uscente, mentre nelle cisterne il livello rimane costante, come se fossero punti con disponibilità d'acqua infinita.

In sostanza, l'entità Tanks viene utilizzata per modellare serbatoi di testata o d'estremità, ovvero quegli elementi in cui le fluttuazioni del livello piezometrico sono significative e non possono essere ignorate. Questa variazione è espressa in EPANET 2.2 attraverso la seguente formula:

$$\Delta L = \frac{Q}{A} * \Delta t$$

dove  $\Delta L$  rappresenta la variazione del livello d'acqua,  $Q$  la portata che entra o esce dal serbatoio,  $A$  l'area della sezione trasversale del serbatoio e  $\Delta t$  l'intervallo temporale. Ovviamente i serbatoi a livello variabile saranno definiti da alcuni parametri quali la quota del fondo, il diametro, il livello minimo della risorsa, il livello massimo ed il livello iniziali.

I "Reservoirs" vengono usati in EPANET 2.2 come elementi con capacità infinita e con carico costante, come nel caso delle falde acquifere. Questo implica che tutti gli impianti di produzione della rete idrica devono essere rappresentati come "Reservoirs". Per quanto riguarda gli attributi, questi elementi sono caratterizzati dal valore del carico totale. Inoltre, è possibile associare a ciascuno di essi un "Head Pattern", ovvero un modello di comportamento dei carichi in modo da non considerare per tutto il periodo della simulazione un singolo valore.

Gli elementi "Links", come menzionato in precedenza, si suddividono in tubazioni, valvole e pompe. Le tubazioni sono rappresentate come entità "Pipes" e svolgono la funzione di trasportare la risorsa tra due giunzioni distinte. Secondo i principi idraulici, la direzione del flusso dipende dalla differenza di carico piezometrico tra i due nodi terminali della condotta, e il flusso avviene nella direzione in cui il carico diminuisce. Per definire questi elementi all'interno del programma, sono necessari i seguenti parametri: nodo iniziale, nodo finale, diametro, lunghezza e coefficiente di scabrezza assoluta.

Per il calcolo delle perdite di carico distribuite lungo la condotta EPANET 2.2 propone tre leggi note dall'Idraulica delle correnti in pressioni che possono essere selezionate di "default" all'inizio del progetto. Esse sono:

- Hazen-Williams, valida solamente in regime di moto turbolento di transizione e per l'acqua;
- Chezy-Manning, valida solamente in regimi di moto assolutamente turbolento;
- Darcy-Weisbach, adatta alle diverse condizioni del moto (moto laminare, regime di transizione, e puramente turbolento).

Un'altra tipologia di link è costituita dalle pompe o dai sistemi di sollevamento; in EPANET 2.2, queste vengono modellate come "pumps". La loro realizzazione avviene collegando il link della pompa alla condotta di aspirazione e a quella di mandata. Nel caso in cui le pompe siano utilizzate per opere di presa, è possibile collegarle direttamente alla vasca di captazione. In EPANET 2.2, il parametro che descrive completamente queste pompe è la curva caratteristica, che rappresenta la relazione tra il flusso che attraversa la pompa e il carico fornito al fluido (prevalenza).

Tutto quello visto fino ad ora rappresenta la parte fisica del sistema idrico, cioè l'insieme di elementi che è possibile trovare fisicamente nella rete. Accanto ad essi, come già accennato all'inizio del paragrafo, vi sono tutti quegli elementi che sono considerati non fisici, cioè non fisicamente presenti nella rete ma indispensabili per descrivere le condizioni operative dell'acquedotto. A questo gruppo appartengono:

-Curves: funzioni che permettono il controllo, ad esempio, dell'efficienza di una pompa in funzione della portata e della prevalenza (curva caratteristica), oppure il controllo del volume e del livello idrico all'interno di un serbatoio.

-Time patterns: rappresenta un insieme di coefficienti moltiplicatori che variano negli intervalli di tempo prestabiliti e che vengono applicati a determinate grandezze per renderle variabili nel tempo (ad esempio la richiesta idrica nei nodi, il carico nei serbatoi, il numero di giri delle pompe).

## 6.COSTRUZIONE DEL MODELLO

### 6.1 Ricostruzione della rete di adduzione

La costruzione del modello rappresenta la fase iniziale della modellazione e si concretizza nella rappresentazione di un network EPANET 2.2 che sia in grado di descrivere nel modo più corretto possibile lo schema topologico della rete digitalizzando tutti gli elementi fisici propri del sistema e delineando tutte le condizioni operative di contorno.

Utilizzando i dati forniti dal progetto esecutivo, è stata ricreata la rete di adduzione inserendo i dati input disponibili. La rete ottenuta è riportata in *figura 6.1*.

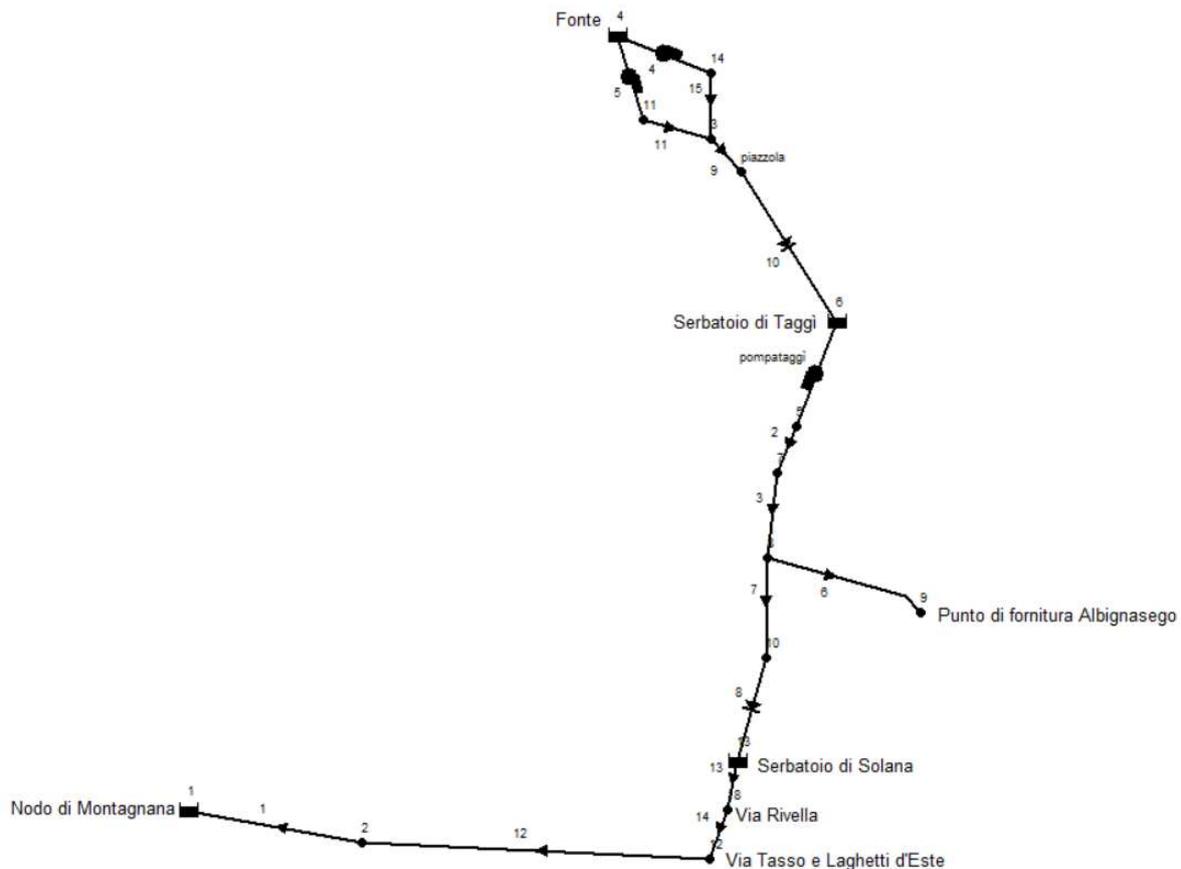


Figura 6.1: Rete di adduzione Camazzole-Montagnana.

Nella presente tesi è stata utilizzata la formula di Darcy-Weisbach per la descrizione del moto in condotta, essendo adatta alle diverse condizioni del moto (moto laminare, regime di transizione, e puramente turbolento).

Sono state, poi, applicate delle semplificazioni alla rete per cui nodi di giunzione “tanks” sono stati sostituiti a Taggì, a Solana e a Montagnana con dei “reservoirs” in modo tale da semplificare la rete e avere un’incognita in meno, assegnando così la pressione nota desiderata.

Lo scopo in fase preliminare della rete è stato quello di ottenere un sistema idraulicamente ragionevole. Successivamente, sono state esaminate ulteriori ipotesi per la costruzione del modello. Per quanto riguarda il serbatoio di Solana, si è ipotizzato che venga riempito dall'alto. Pertanto, nella condotta di mandata è stata modificata la caratteristica del tubo inserendo una valvola di non ritorno (check valve), in modo che l'acqua fluisca solo verso valle, impedendo il suo ritorno verso l'alto.

È stato assegnato un time pattern, ricavato dalla relazione di progetto, a ciascun serbatoio (“reservoirs”) inserendo gli andamenti dei livelli idrici per 24 ore (*figura 4.6*). Inoltre, ne è stato costruito un ulteriore con i coefficienti moltiplicativi di variazione oraria dei consumi giornalieri, da inserire nei dati input dei nodi di domanda. In *figura 6.2* si riporta il time pattern di esempio per i

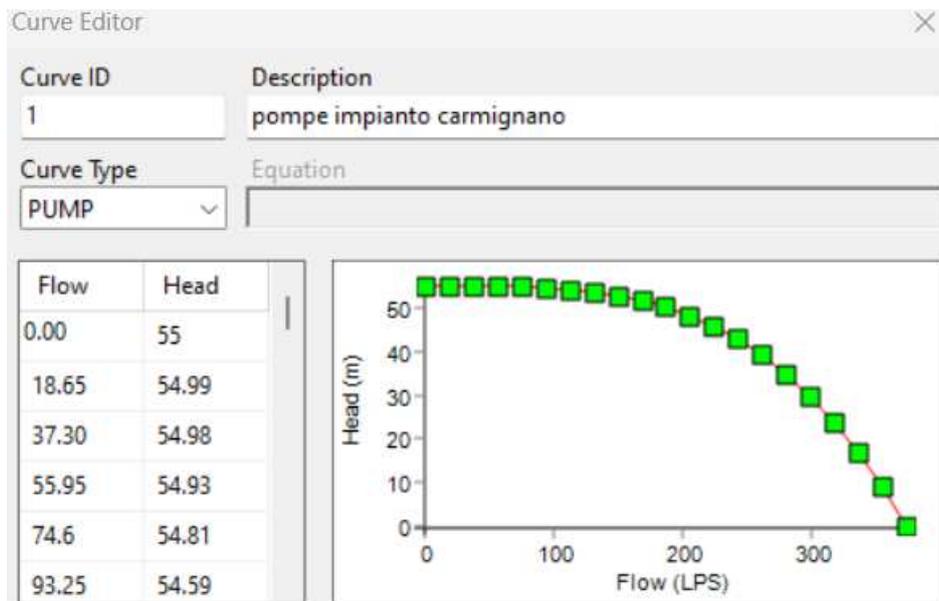
consumi giornalieri. Si è ritenuto che l'intervallo più rappresentativo fosse di 15 minuti; tuttavia, poiché nella relazione di progetto sono forniti coefficienti su base oraria, nel time pattern è stato quindi riportato lo stesso valore per quattro volte. Si può notare dalla *figura 6.2* che gli andamenti presentano due zone di picco in corrispondenza dei periodi di massima richiesta idrica che corrispondono al mattino e al tardo pomeriggio/sera.



*Figura 6.2: Andamento Time Pattern sui consumi giornalieri*

Nella definizione del Time Pattern vengono definiti un totale di 96 coefficienti moltiplicativi che simulano la variabilità della grandezza alla quale il Time Pattern è applicato. Con l'obiettivo della costruzione degli scenari rappresentativi delle possibili condizioni di funzionamento del sistema acquedottistico in regime di idroesigenza, si è scelta come unità temporale di riferimento quella giornaliera, in quanto ritenuta sufficientemente rappresentativa di un intero ciclo di riempimento e svuotamento dei serbatoi di rete.

Per ogni pompa viene assegnata una curva la cui interfaccia EPANET 2.2 si presenta nel seguente modo:



*Figura 6.3: Interfaccia EPANET 2.2 con rappresentazione della curva caratteristica delle pompe dell'impianto di sollevamento di Carmignano*

Le curve caratteristiche per i sistemi di pompaggio sono state prese dalla relazione di Acquevenete già tarate e sono state inserite in EPANET 2.2 come mostrato in *figura 6.3*.

## 6.2 Analisi di sensibilità sul modello

L'analisi di sensibilità sul modello permette di determinare quanto le variazioni degli input di un modello o di un sistema influenzino i risultati in output. L'obiettivo principale è identificare quali parametri o variabili hanno il maggiore impatto sui risultati. Questo aiuta a focalizzarsi sui fattori più critici da monitorare e gestire. Per eseguire l'analisi di sensibilità viene fatta una variazione sistematica di una singola variabile mentre si mantengono costanti le altre. I risultati delle analisi di sensibilità mostrano come i cambiamenti in un parametro specifico influenzano i risultati finali. In sintesi, le analisi di sensibilità sono uno strumento fondamentale per la valutazione dell'incertezza e per prendere decisioni informate in presenza di variabilità nelle informazioni e nei parametri del modello.

Le varie analisi e osservazioni si concentrano sul tratto di rete che va da Solana a Montagnana, riferendosi in particolare al serbatoio di Montagnana (figura 6.4).

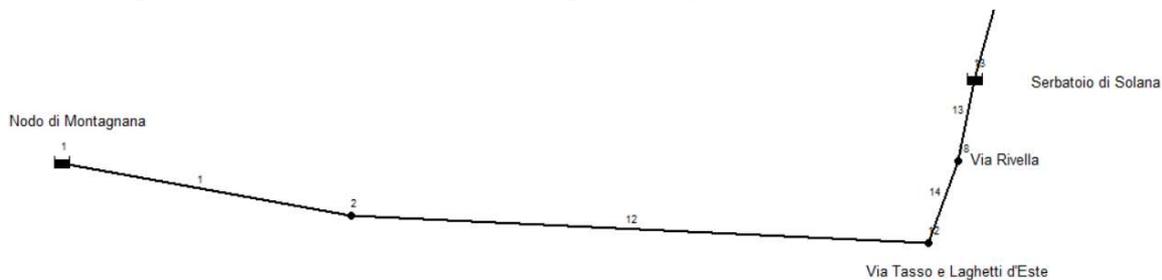


Figura 6.4: Rete di adduzione Solana-Montagnana

### Prima analisi

È stato fissato il diametro a 600 mm e variata la scabrezza delle condotte nel range 0.2-3 mm, osservando come varia la portata nella condotta 1 di mandata al serbatoio di Montagnana.

Nelle figure 6.5-6.8, vengono riportati i risultati in termini di portata con scabrezza pari a 3 mm, 2 mm, 1 mm e 0.2 mm:



Figura 6.5: Portata alla condotta 1 con 3 mm di scabrezza

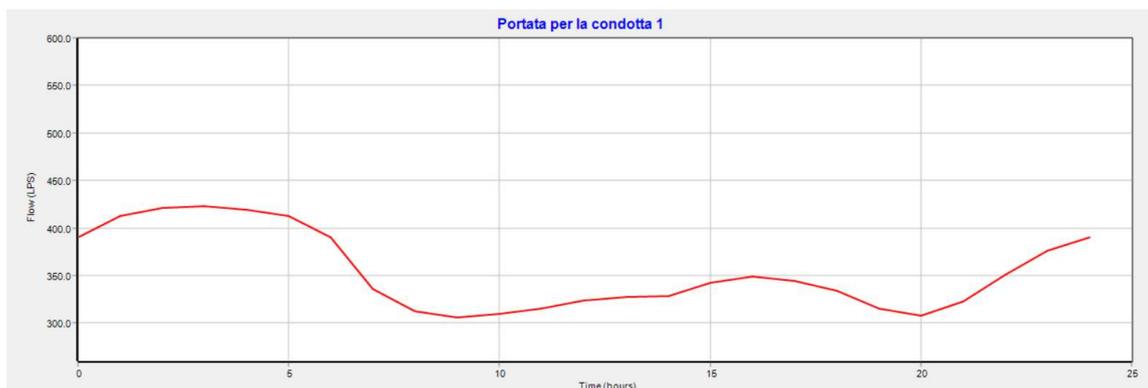


Figura 6.6: Portata alla condotta 1 con 2 mm di scabrezza

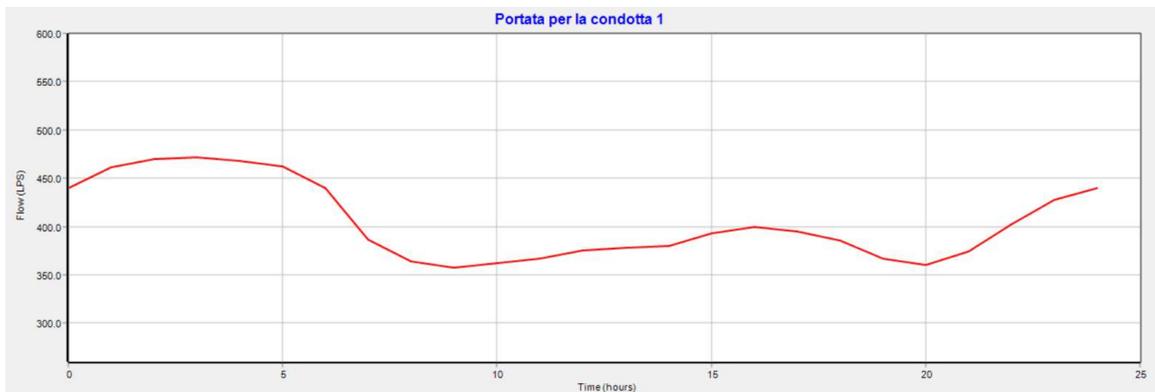


Figura 6.7: Portata alla condotta 1 con 1 mm di scabrezza

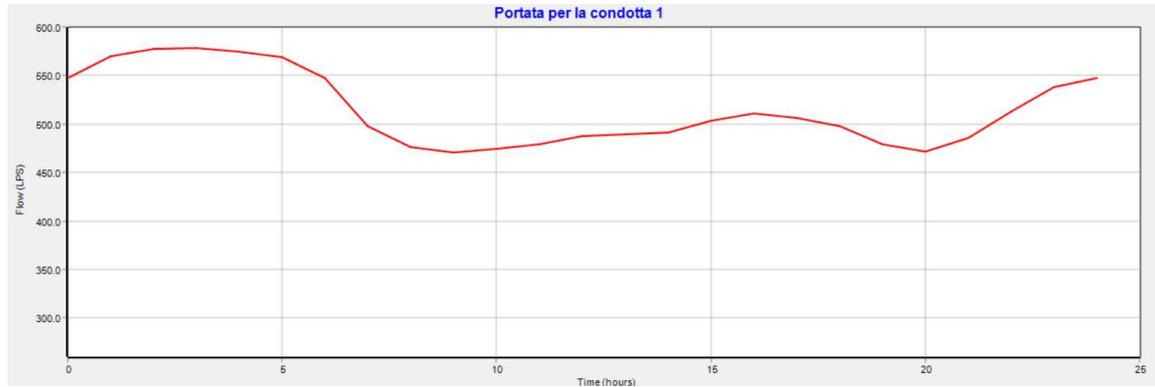


Figura 6.8: Portata alla condotta 1 con 0.2 mm di scabrezza

La scabrezza di una tubazione si riferisce alla rugosità interna delle pareti della tubazione stessa. Questo parametro è importante perché influisce sulla resistenza al flusso di un fluido all'interno del tubo. Una tubazione con una scabrezza maggiore avrà una maggiore resistenza al flusso, causando una perdita di carico più elevata rispetto a una tubazione liscia.

Dalle figure 6.5- 6.8 emerge chiaramente che, all'aumentare della scabrezza, si verifica una riduzione della portata nella condotta. In particolare, si passa da 580 l/s con una scabrezza di 0.2 mm a 390 l/s con una scabrezza di 3 mm, corrispondente al picco massimo. In figura 6.9 si può osservare l'andamento della variazione delle portate al variare della scabrezza in corrispondenza al picco massimo.

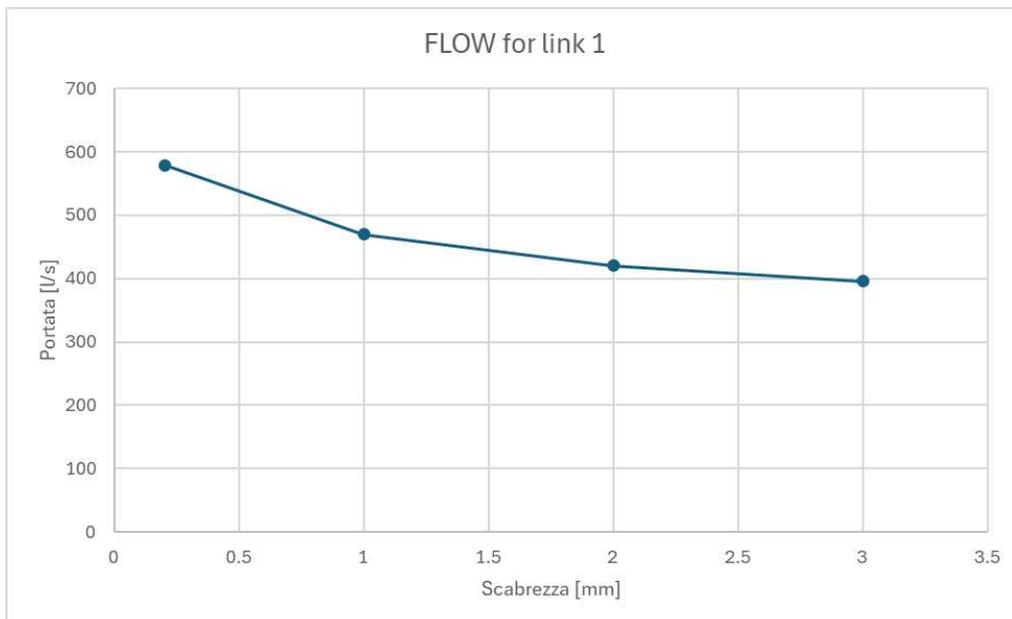


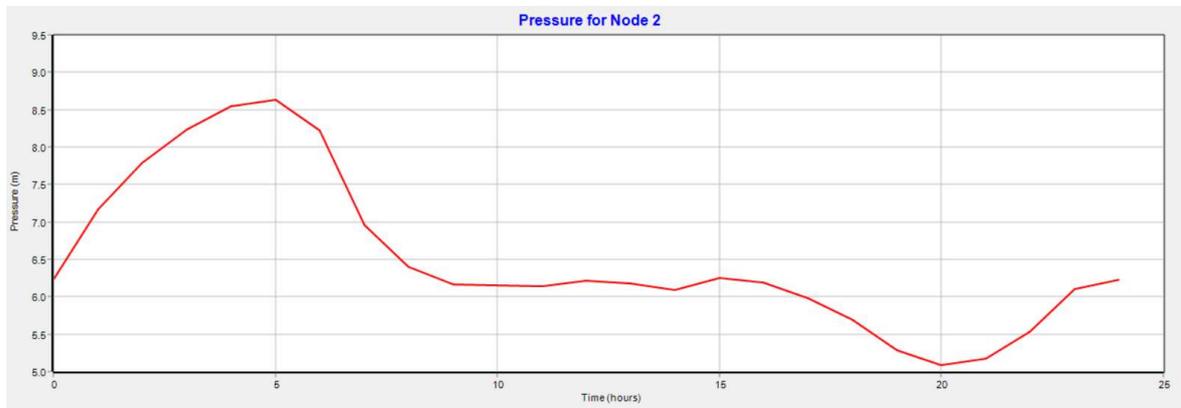
Figura 6.9: Andamento della variazione della portata al variare della scabrezza nella condotta 1 (vedi figura 6.4).

Da tenere in considerazione che la scabrezza dipende anche dal materiale della tubazione; ad esempio, tubazioni metalliche, in PVC o in acciaio inox avranno diverse caratteristiche di scabrezza. Inoltre, la scabrezza può aumentare nel tempo a causa di fattori come la corrosione o l'accumulo di sedimenti.

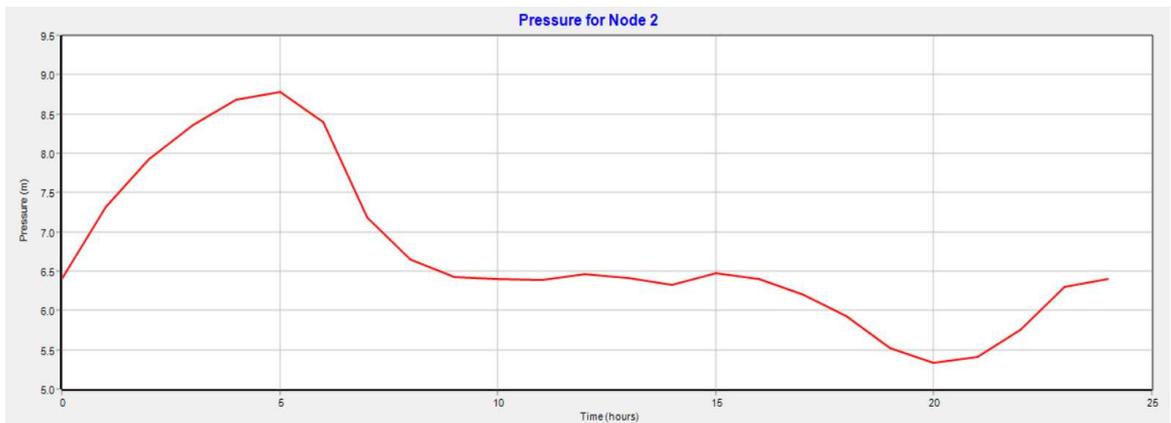
### Seconda analisi

È stato fissato il diametro a 600 mm e variata la scabrezza delle condotte nel range 0.2-3 mm, osservando come varia la pressione nel nodo 2 a valle del serbatoio di Montagnana.

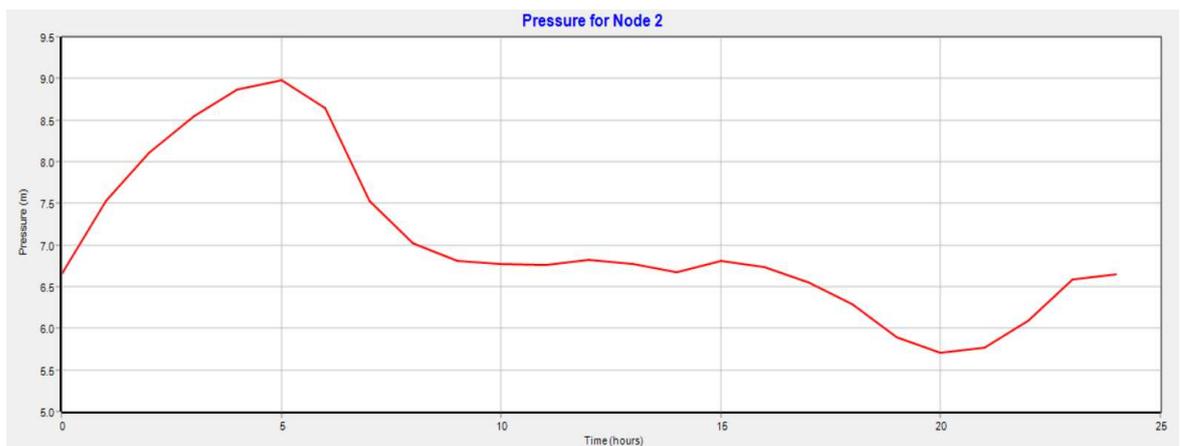
Nelle figure 6.10- 6.13, vengono riportati i risultati in termini di pressione con scabrezza pari a 3 mm, 2 mm, 1 mm e 0.2 mm:



*Figura 6.10: Pressione al nodo 2 con 3 mm di scabrezza*



*Figura 6.11: Pressione al nodo 2 con 2 mm di scabrezza*



*Figura 6.12: Pressione al nodo 2 con 1 mm di scabrezza*

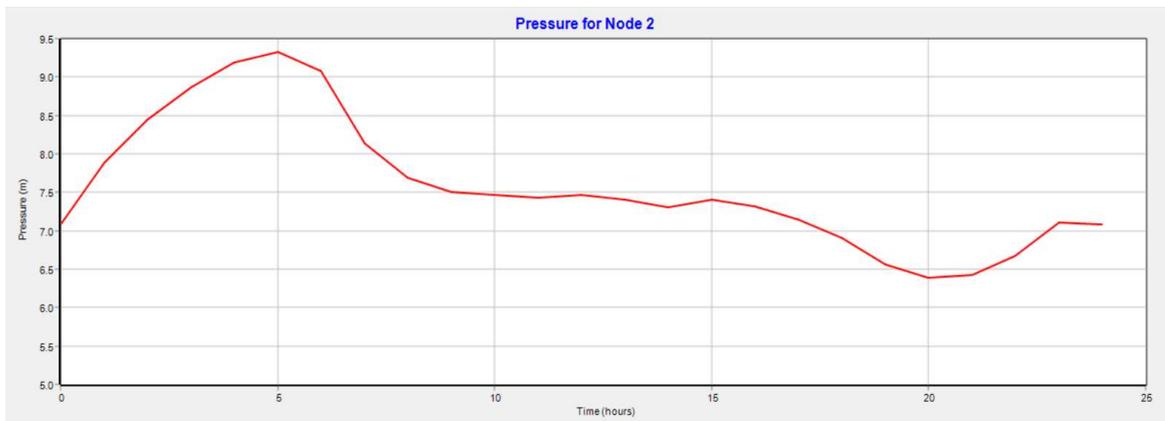


Figura 6.13: Pressione al nodo 2 con 0.2 mm di scabrezza

Dalle figure 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 emerge che, all'aumentare della scabrezza, si verifica una riduzione della pressione nel nodo. In particolare, si passa da 9.4 m con una scabrezza di 0,2 mm a 8.5 m con una scabrezza di 3 mm, corrispondente al picco massimo. In figura 6.14 si può osservare l'andamento della variazione delle pressioni al variare della scabrezza in corrispondenza al picco massimo.

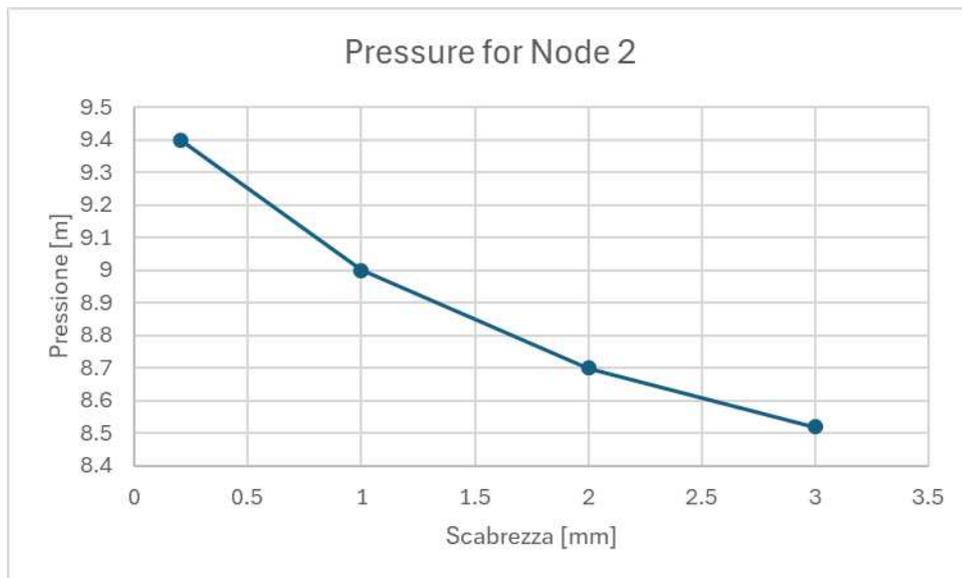
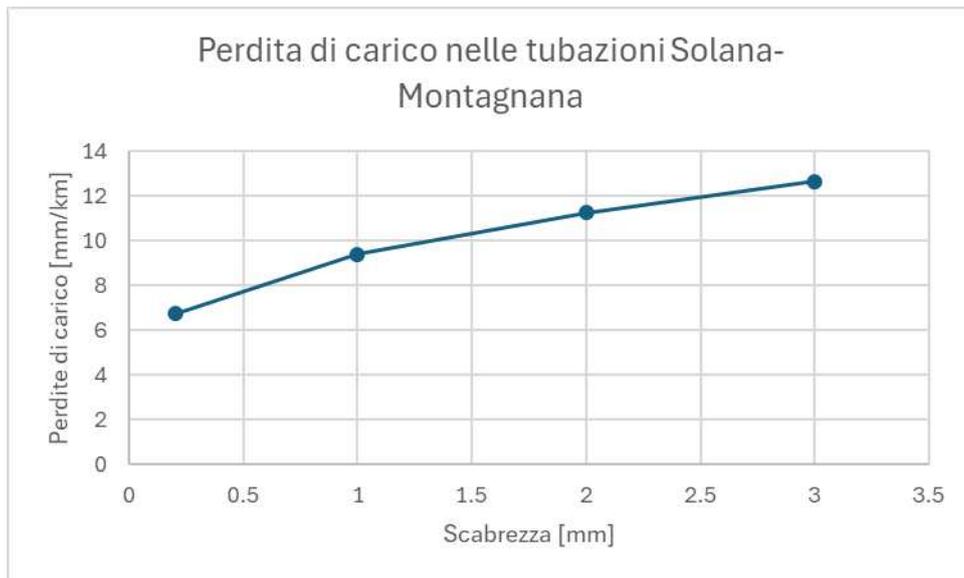


Figura 6.14: Andamento della variazione della pressione al variare della scabrezza nel nodo 2 (vedi figura 6.4).

Quando un fluido, come l'acqua, scorre attraverso una tubazione, la scabrezza della superficie interna della tubazione provoca una resistenza al flusso. Questo fenomeno è descritto dalla legge di Darcy-Weisbach, che quantifica la perdita di carico (ovvero la perdita di energia sotto forma di pressione) dovuta all'attrito. La perdita di carico è proporzionale alla lunghezza della condotta, alla velocità del fluido e alla scabrezza della superficie. Maggiore è la scabrezza, maggiore sarà la perdita di carico. Le perdite di carico dovute all'attrito possono portare a variazioni di pressione nei diversi nodi della rete. Nei punti in cui ci sono maggiori perdite di carico, la pressione sarà più bassa rispetto a punti con minori perdite.

In seguito, è stata eseguita un'analisi di sensibilità anche sulle perdite di carico fissando il diametro a 600 mm e variando da 0.2 a 3 mm la scabrezza delle condotte, osservando con particolare attenzione come varia la perdita di carico nell'ultima parte di tubazioni che collegano il serbatoio Montagnana (tubazione di lunghezza pari a 4 km).

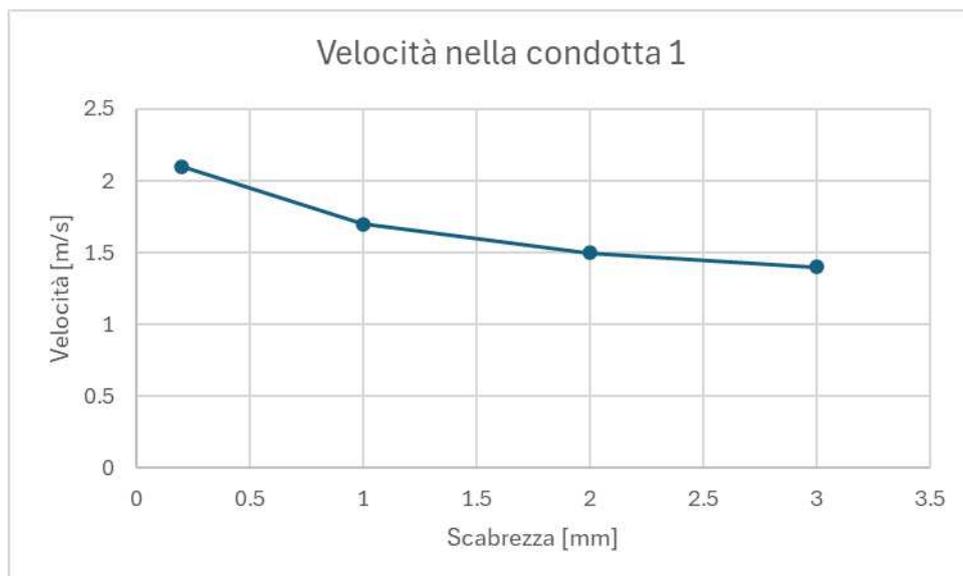
Per ottenere i metri persi effettivi nel tubo è stato calcolato il rapporto tra la lunghezza della condotta e la rispettiva perdita di carico. I risultati sono riportati in *figura 6.15*.



*Figura 6.15: Andamento delle variazioni delle perdite di carico al variare della scabrezza*

In sintesi, la scabrezza della superficie delle tubazioni incide sulle perdite di carico e pertanto influisce direttamente sulla pressione nei nodi di una rete di adduzione. Per una gestione efficace, è importante effettuare dei calcoli per prevedere come la scabrezza influirà sul sistema e prendere misure adeguate a minimizzare l'impatto.

Infine, è stata condotta un'analisi di sensibilità riguardante le velocità in condotta, poiché la perdita di carico è proporzionale anche alla velocità del fluido. Mantenendo il diametro fissato a 600 mm e variando da 0.2 a 3 mm la scabrezza delle condotte, si è prestata particolare attenzione alle variazioni di velocità nella condotta 1. I risultati sono riportati in *figura 6.15 bis*.



*Figura 6.15 bis: Andamento della variazione di velocità al variare della scabrezza nella condotta 1 (vedi figura 6.4).*

Maggiore è la scabrezza della superficie della condotta, maggiore sarà la resistenza al flusso del fluido. Questo porta a una maggiore perdita di carico e una diminuzione della velocità del fluido.

### Terza analisi

È stata fissata la scabrezza a 2 mm e variato il diametro delle condotte nel range 400-600 mm, osservando come varia la portata nella condotta 1 di mandata al serbatoio di Montagnana.

Nelle figure 6.16- 6.18, vengono riportati i risultati in termini di portata con diametro pari a 600 mm, 500 m, 400 mm.

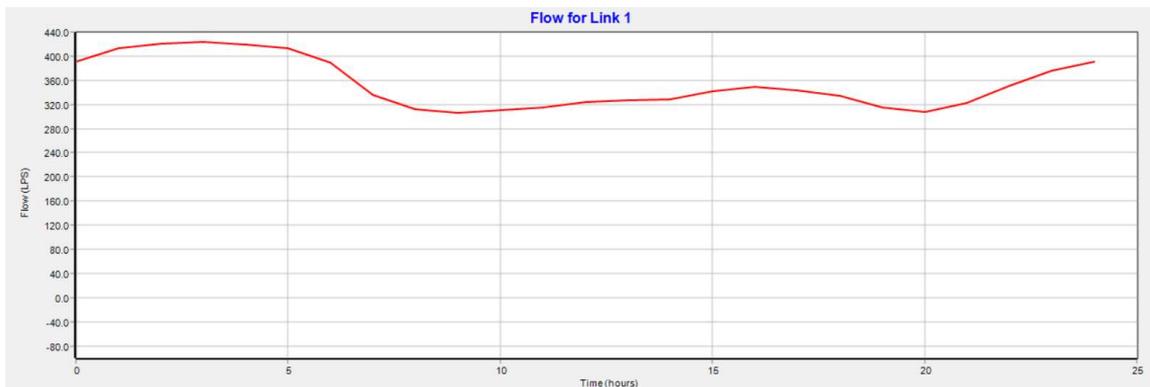


Figura 6.16: Portata alla condotta 1 con 600 mm di diametro

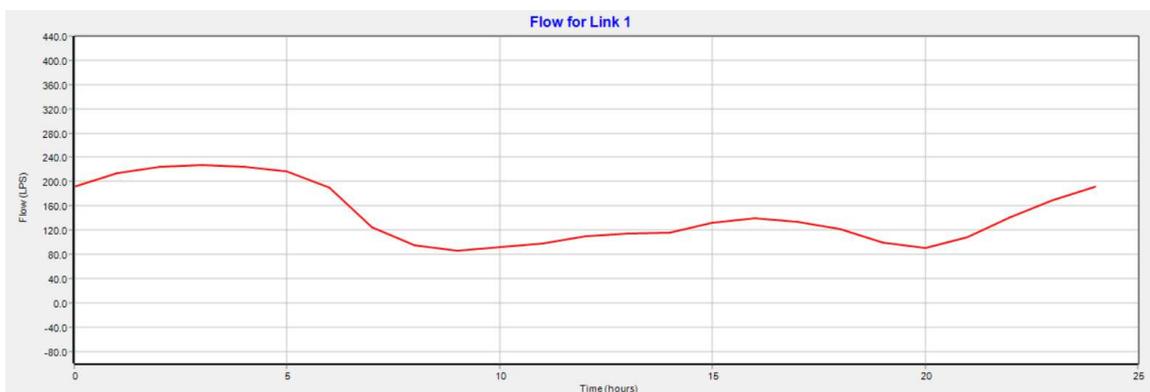


Figura 6.17: Portata alla condotta 1 con 500 mm di diametro

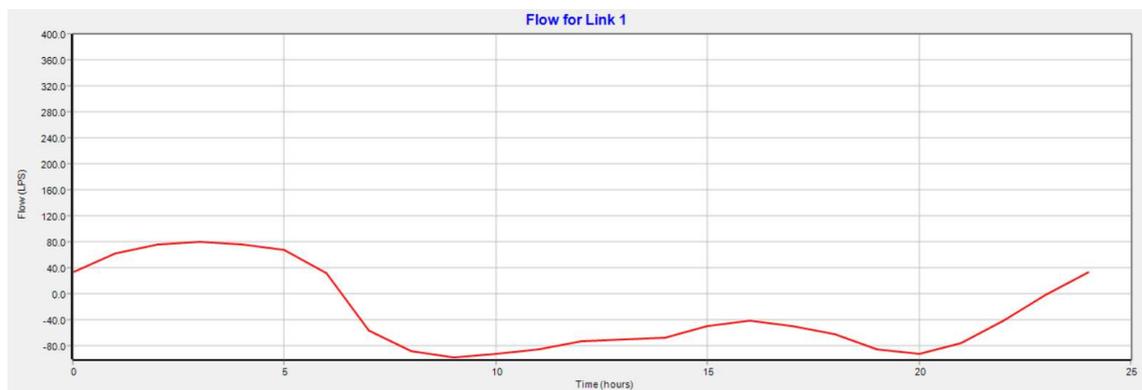


Figura 6.18: Portata alla condotta 1 con 400 mm di diametro

La portata di un fluido che scorre attraverso una condotta varia in base al diametro della condotta stessa. La portata ( $Q$ ) è definita come il volume di fluido che passa attraverso una sezione della condotta in un'unità di tempo:

$$Q = v * A$$

dove:

- $Q$  è la portata ( $m^3/s$ ),
- $A$  è l'area della sezione trasversale della condotta ( $m^2$ ),

-  $v$  è la velocità del fluido (m/s).

L'area della sezione trasversale di una condotta cilindrica è data da:

$$A = \pi r^2$$

dove  $r$  è il raggio della condotta.

Dalle figure 6.16- 6.18 emerge chiaramente che, all'aumentare del diametro, si verifica un aumento della portata in condotta. In particolare, si passa da 80 l/s con un diametro di 400 mm a 420 l/s con un diametro di 600 mm, corrispondente al picco massimo. Si può osservare l'andamento della variazione delle portate al variare del diametro in figura 6.19 corrispondente al picco massimo.

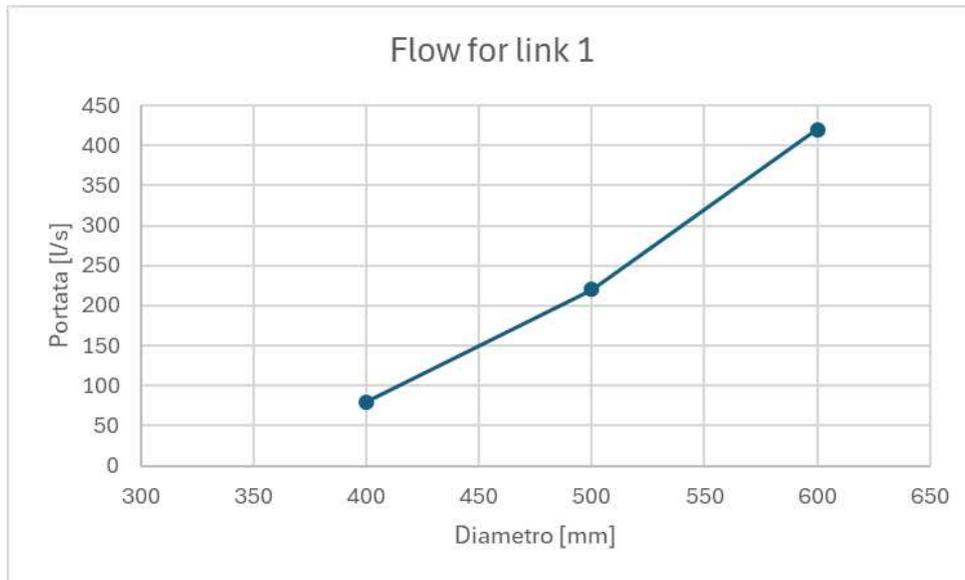


Figura 6.19: Andamento della variazione delle portate al variare del diametro nella condotta 1 (vedi figura 6.4).

Infine, è stata condotta un'analisi di sensibilità riguardante le velocità in condotta, poiché la portata è proporzionale alla velocità del fluido. Mantenendo la scabrezza fissata a 2 mm e variando da 400 a 600 mm il diametro delle condotte, si è prestata particolare attenzione alle variazioni di velocità nella condotta 1. I risultati sono riportati in figura 6.19 bis.

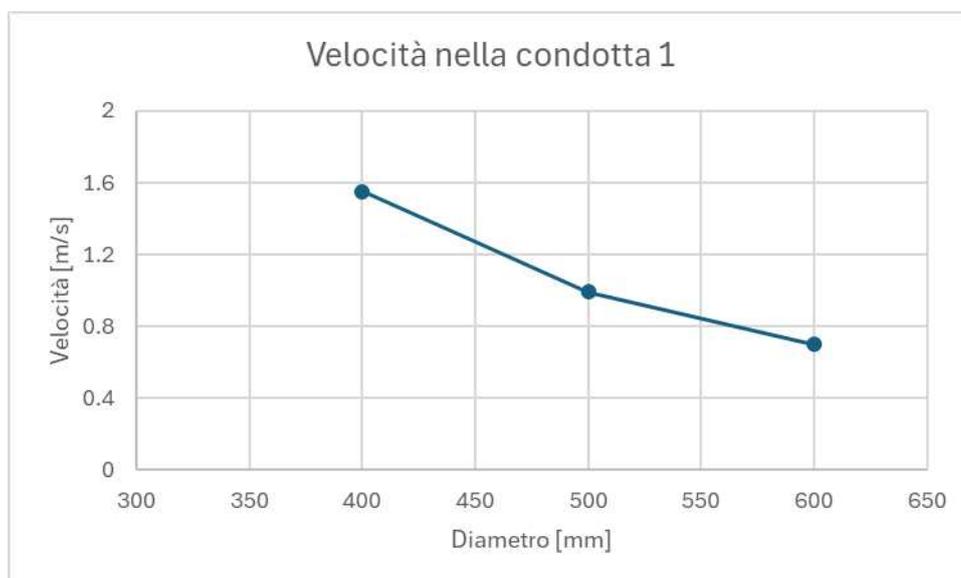


Figura 6.19 bis: Andamento della variazione di velocità al variare del diametro nella condotta 1 (vedi figura 6.4).

Maggiore è il diametro della condotta, maggiore sarà l'area di sezione trasversale. Questo porta a una maggiore portata e una diminuzione della velocità del fluido.

### Quarta analisi

È stata fissata la scabrezza a 2 mm e variato il diametro delle condotte nel range 400-600 mm, osservando come varia la pressione nel nodo 2 a valle del serbatoio di Montagnana.

Nelle figure 6.20- 6.22, vengono riportati i risultati in termini di pressione con il diametro pari a 600 mm, 500 mm, 400 mm.

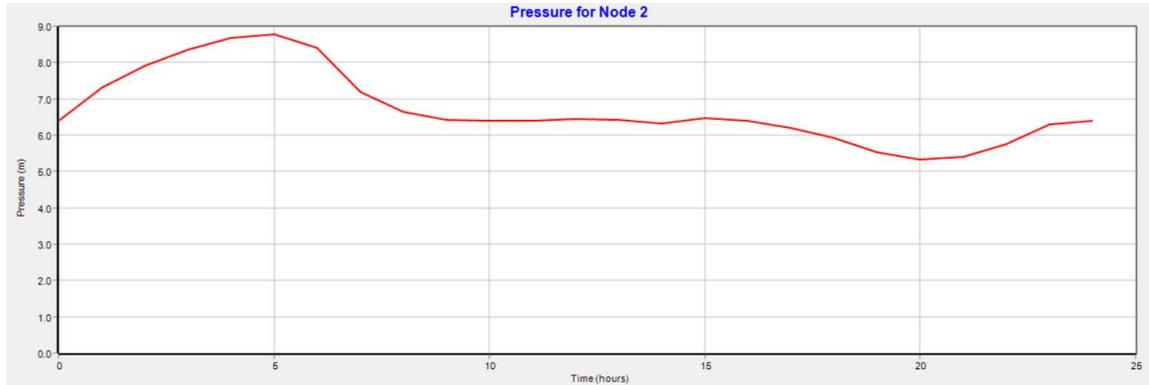


Figura 6.20: Pressione al nodo 2 con 600 mm di diametro

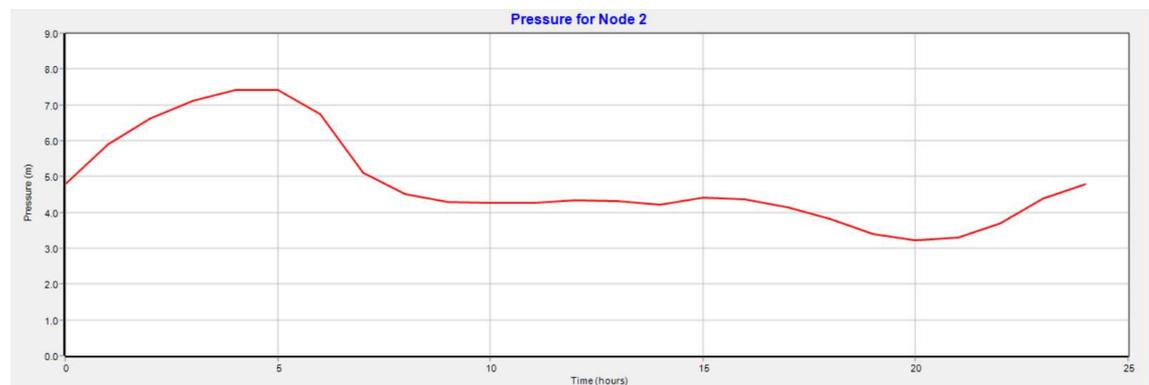


Figura 6.21: Pressione al nodo 2 con 500 mm di diametro

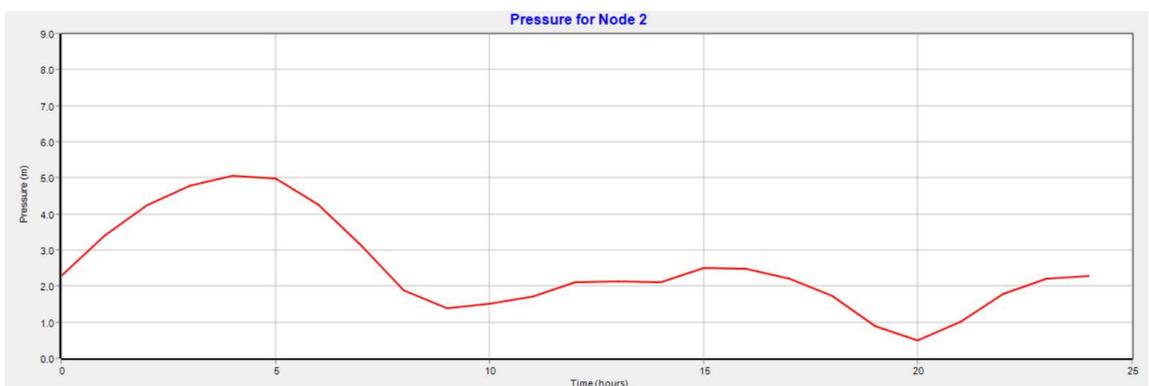
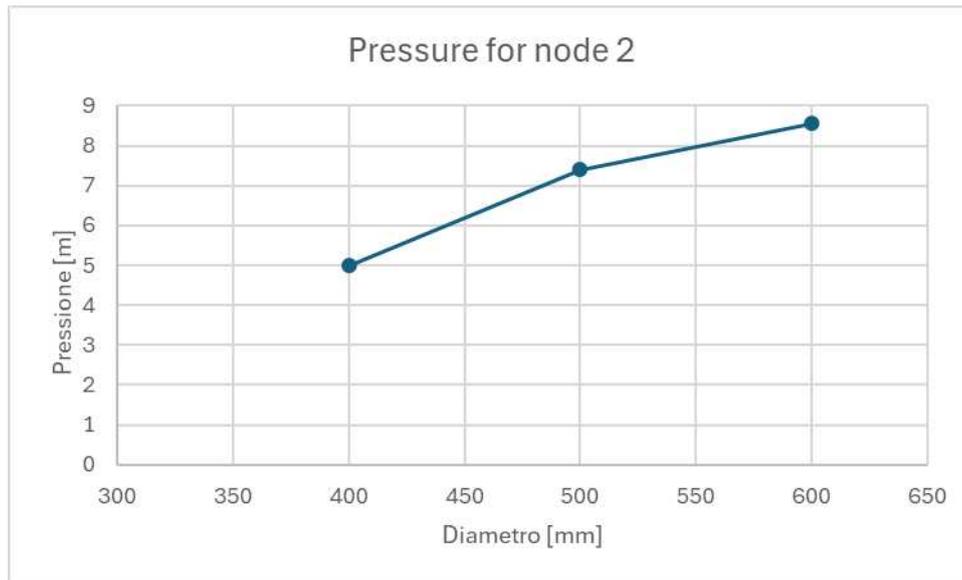


Figura 6.22: Pressione al nodo 2 con 400 mm di diametro

La variazione di diametro in una condotta ha un effetto significativo sulla pressione del fluido che vi scorre. Questo fenomeno è descritto dalla legge di Bernoulli e dalla continuità del flusso.

Dalle *figure 6.20- 6.22* emerge chiaramente che, all'aumentare del diametro, si verifica un aumento della pressione. In particolare, si passa da 5 m con un diametro di 400 mm a 8.6 m con un diametro di 600 mm, corrispondente al picco massimo. Si può osservare l'andamento della variazione della pressione al variare del diametro in *figura 6.23* corrispondente al picco massimo.



*Figura 6.23: andamento della variazione della pressione al variare del diametro nel nodo 2 (vedi figura 6.4).*

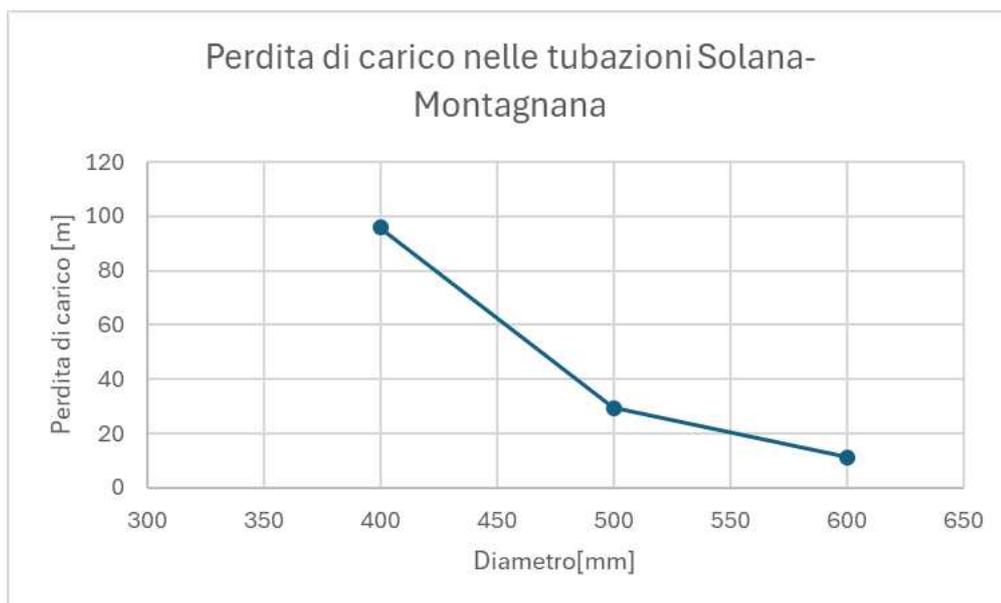
In sintesi, quando il diametro di una condotta varia, si ha una variazione della velocità del fluido e, quindi, anche nella pressione. Un incremento di diametro porta a una diminuzione della velocità e un aumento della pressione, mentre un restringimento provoca un aumento della velocità e una diminuzione della pressione.

La pressione in un sistema di acquedotto è direttamente collegata alla perdita di carico. Quando si verifica una perdita di carico, la pressione disponibile per il fluido diminuisce.

La perdita di carico è la riduzione della pressione del fluido mentre passa attraverso una condotta, a causa dell'attrito e di altre forze resistive. La perdita di carico può essere influenzata da diversi fattori, tra cui il diametro. Se il diametro aumenta, la velocità del fluido diminuisce e, di conseguenza, la perdita di carico dovuta all'attrito diminuisce. Al contrario, se il diametro diminuisce, la velocità aumenta e la perdita di carico aumenta a causa dell'incremento delle turbolenze.

In seguito, è stata eseguita un'analisi di sensibilità anche sulle perdite di carico tenendo fissa la scabrezza a 2 mm e variando da 600 a 400 mm il diametro delle condotte, osservando con particolare attenzione come varia la perdita di carico nell'ultima parte di tubazioni che collegano il serbatoio di Montagnana (tubazione di lunghezza totale di 4 km).

Per ottenere i metri persi effettivi nel tubo è stato eseguito il rapporto tra la lunghezza della condotta e la rispettiva perdita di carico. I risultati sono riportati in *figura 6.24*.



*Figura 6.24: andamento delle variazioni delle perdite di carico al variare del diametro*

Dalle quattro analisi di sensibilità eseguite si può notare che la variazione di diametro di una condotta ha un'influenza più significativa sui parametri di pressione e portata rispetto alla variazione di scabrezza, considerati i range di variazione stabiliti per questo studio.

### 6.3 Analisi su serbatoio di Montagnana

Lo scopo di questa analisi è di ottenere un andamento giornaliero delle portate del serbatoio avendo la variazione del livello idrico del serbatoio di progetto.

La superficie di area del serbatoio è stata dedotta per via analitica usando la seguente formula:

$$V = \pi * h * \frac{d^2}{4} \quad (1)$$

dove V indica il volume del serbatoio, h l'altezza e d il diametro;

Nella (1) l'unica incognita è il diametro dal quale si può risalire alla superficie (A) considerando il serbatoio cilindrico a base circolare.

Per il serbatoio di Montagnana:

$$V = 10.000 \text{ m}^3$$

$$h = 5.7 \text{ m}$$

$$d = 40 \text{ m} \rightarrow r = 20 \text{ m}$$

$$A(\text{superficie}) = \pi * r^2 = 1754.4 \text{ m}^2$$

In seguito, si è andato a calcolare la variazione di quota (total head) facendo la differenza tra quota finale e quota iniziale ogni 15 minuti:

$$\Delta L = L_{\text{finale}} - L_{\text{iniziale}}$$

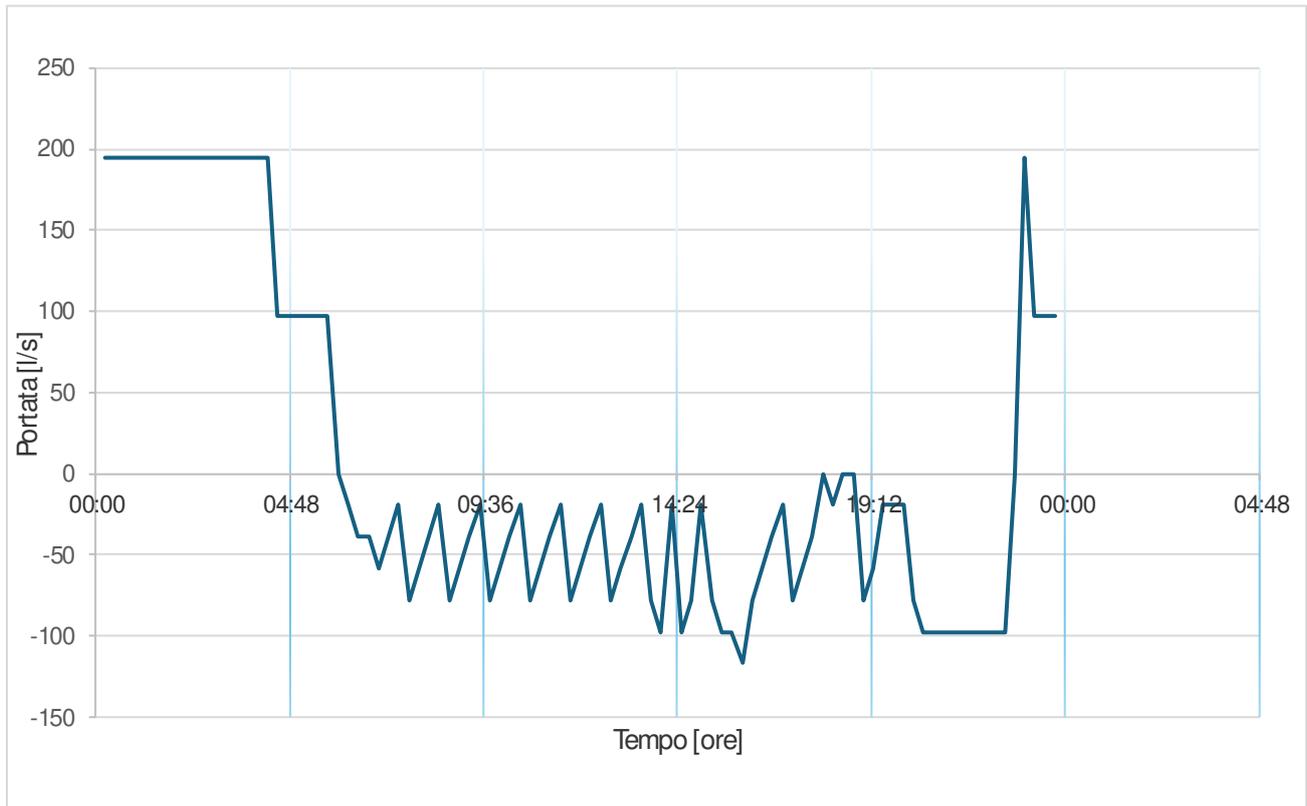
Dopodiché moltiplicando la variazione di quota  $\Delta L$  per l'area A calcolata precedentemente si ottiene la variazione di volume  $\Delta V$ , sempre nell'intervallo di tempo di 15 minuti:

$$\Delta V = \Delta L * A$$

Infine, si è calcolato la portata volumetrica nel serbatoio ogni 15 minuti con il rapporto tra la variazione di volume e il tempo.

$$Q = \frac{\Delta V}{T(15\text{min})}$$

Eseguendo tutte le operazioni in un foglio di calcolo si riesce a costruire il grafico rappresentativo delle variazioni di portata di 24 ore nel serbatoio di Montagnana, come illustrato in *figura 6.25*.

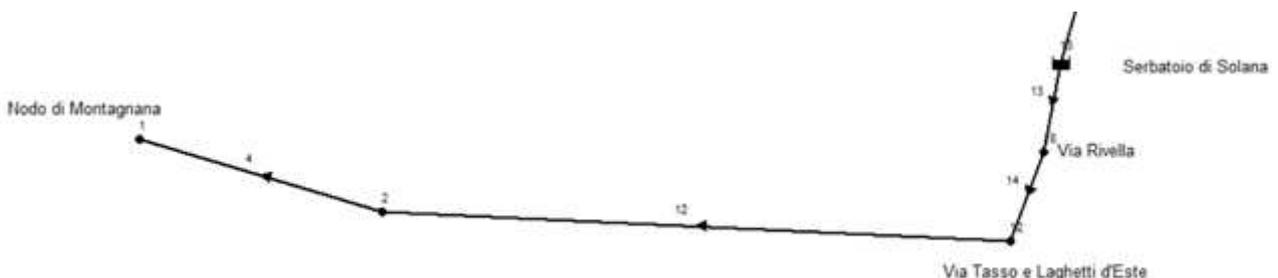


*Figura 6.25: Variazioni di portata di 24 ore nel serbatoio di Montagnana*

Quando il valore della portata è positivo, indica che l'acqua sta fluendo nel serbatoio; al contrario, un valore negativo significa che l'acqua sta defluendo dal serbatoio.

Dalla *figura 6.25* si nota che durante le ore notturne il serbatoio si riempie, mentre nelle ore diurne l'acqua viene rilasciata dal serbatoio.

In EPANET 2.2 si sostituisce il "reservoir" di Montagnana con un nodo tramite l'opzione "Junction" come mostrato in *figura 6.26*, in modo tale da vincolare la portata ed eliminare la piezometrica, assegno al nodo la quota del serbatoio (15 m), la "base demand" pari ad uno e inserendo il pattern delle portate di Montagnana calcolate precedentemente.



*Figura 6.26: rete di adduzione Solna-Montagnana*

Si nota che, una volta stabilita la domanda attraverso il "demand pattern" costruito e definita la pressione (ovvero, la quota), i nodi a valle del nodo di Montagnana devono presentare una pressione

positiva. Questa pressione è inversamente proporzionale alla portata del nodo di Montagnana, come evidenziato dal confronto tra la figura 6.27 e la figura 6.28. I picchi positivi della portata del nodo di Montagnana corrispondono ai picchi negativi delle pressioni dei nodi a valle.

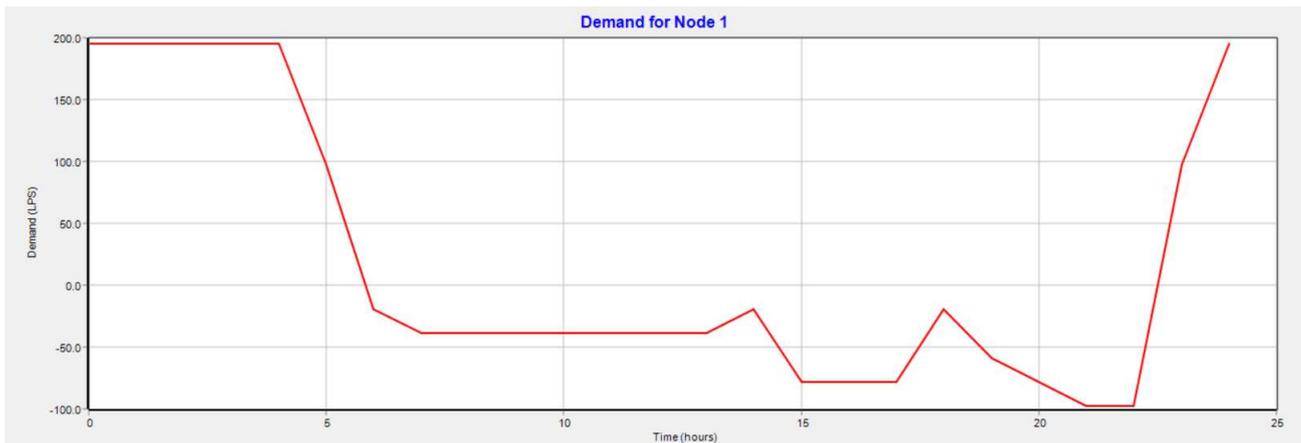


Figura 6.27: Portata dal nodo 1 (serbatoio di Montagnana)

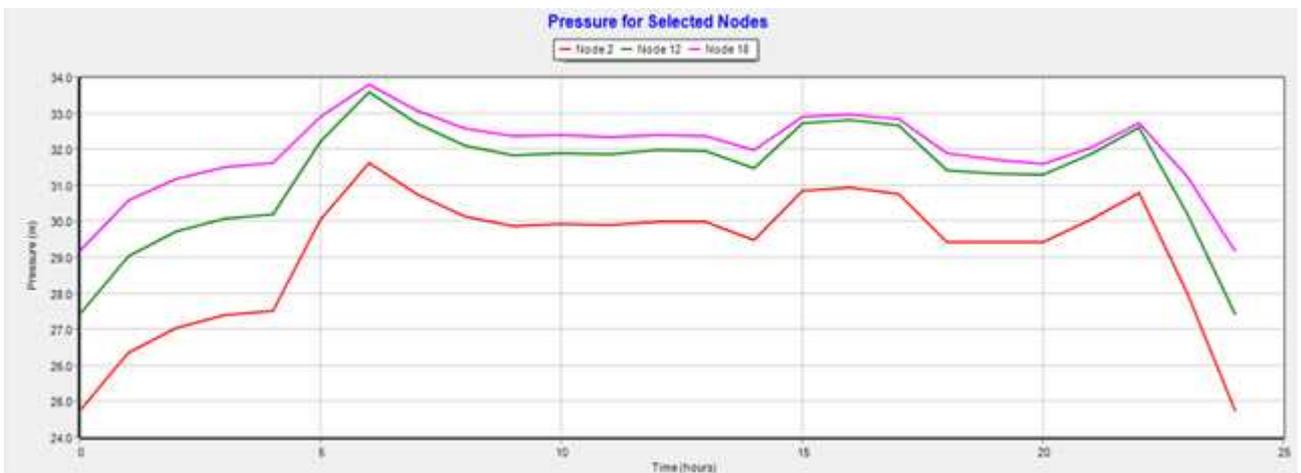


Figura 6.28: Pressione dei nodi 2, 12 e 18

Nelle tubazioni di un acquedotto, esiste un legame diretto tra la domanda di acqua (cioè, il volume d'acqua richiesto dagli utenti) e la pressione all'interno della tubazione.

La pressione nella tubazione è ciò che spinge l'acqua a fluire e, quando la domanda d'acqua aumenta (per esempio, quando molte persone aprono i rubinetti contemporaneamente), il flusso d'acqua richiesto aumenta.

Per la legge di conservazione della massa, quando aumenta la portata d'uscita, significa che una maggiore quantità di acqua sta fluendo fuori dal serbatoio. Questo porta a una diminuzione del livello dell'acqua nel serbatoio, che a sua volta può influire sulla pressione idrostatica all'interno del serbatoio stesso.

Inoltre, la pressione in un liquido in un serbatoio è funzione della profondità del liquido. Se la portata d'uscita aumenta, il livello dell'acqua nel serbatoio scende. Di conseguenza, la pressione a livello dei nodi a valle, che dipende dall'altezza del liquido sopra di essi, diminuisce.

Un aumento della portata d'uscita può anche aumentare la velocità del flusso e quindi le perdite di carico dovute alla resistenza del sistema (come nelle tubazioni, curve, riduzioni, etc.). Questo può portare a una ulteriore diminuzione della pressione nei punti a valle.

Il sistema idraulico cerca di mantenere un equilibrio tra la portata in uscita e la pressione disponibile. Quando aumenta la portata, se non c'è un adeguato compenso nella pressione (ad esempio, attraverso l'aumento della carica idrica nel serbatoio), si verifica una caduta di pressione.

In sintesi, l'acqua che esce dal serbatoio porta via parte dell'energia potenziale, creando una diminuzione della pressione nei nodi a valle dovuta alla combinazione di abbassamento del livello dell'acqua e alle perdite di carico dovute al flusso.

## 7.CONCLUSIONI

La presente tesi ha analizzato l'emergenza PFAS e l'impatto significativo che ha avuto sulla salute pubblica e come le autorità competenti hanno affrontato la problematica. Attraverso un'accurata valutazione delle problematiche legate alla contaminazione da PFAS, è emerso chiaramente come la costruzione di un nuovo tratto di rete di adduzione e un serbatoio di approvvigionamento di acqua non contaminata rappresentino la soluzione più idonea per porre fine a questa crisi.

È importante garantire un servizio idrico di alta qualità, e questo porta a questioni su come gestire al meglio le reti idriche. Questa tesi intende evidenziare come una corretta modellazione numerica rappresenti uno strumento fondamentale per valutare il comportamento idraulico della rete fisica e per gestire in maniera efficace il sistema idrico. Il lavoro analizza il processo di transizione da una realtà fisica a una modellazione numerica, evidenziando le diverse fasi coinvolte, dall'acquisizione dei dati alla calibrazione del modello. Qui, i dati geometrici, e idraulici, spesso non pienamente disponibili o non perfettamente rispondenti alla realtà, rivestono un'importanza fondamentale.

L'obiettivo finale di una modellazione accurata è quello di utilizzare i risultati ottenuti per una gestione ottimale della rete. I risultati presentati nel sesto capitolo della tesi dimostrano che la rete si comporta secondo i principi idraulici di buona progettazione, rendendo il modello utile anche a fini gestionali.

Grazie alla modellazione, è inoltre possibile anticipare il comportamento della rete in situazioni particolari e pianificare interventi sulla base dei risultati ottenuti. Possono essere condotte analisi per qualsiasi condizione di servizio, permettendo di simulare potenziali problematiche, come la rottura di una condotta principale, e di pianificare, sulla base dei report generati dal modello, interventi mirati che garantiscano una qualità e una quantità adeguate della risorsa in ogni circostanza. Attualmente, la modellazione numerica delle reti idriche è essenziale per una gestione efficace dei sistemi acquedottistici.

I risultati ottenuti evidenziano che l'implementazione di queste infrastrutture ha non solo migliorato la qualità dell'acqua distribuita, ma ha anche ripristinato la fiducia della comunità nelle fonti di approvvigionamento idrico. È fondamentale sottolineare come l'innovazione tecnologica e l'investimento in opere pubbliche siano stati elementi chiave per affrontare questa emergenza.

Le implicazioni di questa ricerca si espandono oltre la ristrettezza geografica dell'area interessata, ponendo un esempio positivo per altre comunità colpite da problematiche simili. È fondamentale che le esperienze e le lezioni apprese siano condivise a livello nazionale e internazionale, affinché possano contribuire a una maggiore consapevolezza e prevenzione riguardo ai contaminanti emergenti.

In conclusione, l'esperienza analizzata nel corso di questa tesi sottolinea l'importanza di proseguire investimenti e politiche collaborative per garantire un accesso universale all'acqua potabile di qualità, tutelando così la salute delle popolazioni e preservando l'ambiente. La fine dell'emergenza PFAS non è solo un traguardo tecnico, ma un passo fondamentale verso un futuro più sostenibile e sicuro per tutti.



## BIBLIOGRAFIA

*Acquevenete. MODELLO STRUTTURALE DEGLI ACQUEDOTTI DEL VENETO (MO.S.A.V.). INTERVENTI FINALIZZATI ALLA SOSTITUZIONE DELLE FONTI IDROPOTABILI CONTAMINATE DA SOSTANZE PERFLUORO-ALCHILICHE (PFAS). ESTENSIONE DELLO SCHEMA NELL'AREA MONSELICENSE - ESTENSE – MONTAGNANESE. Regione del Veneto, 2018.*

*Acquevenete. DIMENSIONAMENTI IDRAULICI: RELAZIONE IDRAULICA DEGLI SCENARI ATTUALE E DI PROGETTO. Regione del Veneto, 2018.*

*Da Deppo L., C. Datei, V. Fiorotto e P. Salandin, Acquedotti - 4 Edizione, Libreria Progetto, Padova, 2011.*

## SITTOGRAFIA

<https://www.acquevenete.it/cantieri-per-emergenza-pfas>

<https://www.legambienteveneto.it/inquinamento-da-pfas-il-territorio-interessato/>

<https://serviziarete.it/acqua-senza-pfas-per-montagnana-e-area-berica-in-gara-i-lavori/>

<https://mutans.biologia.unipd.it/it/pfas-storia-e-contaminazione/>

<https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/acque-interne/sostanze-perfluoro-alchiliche-pfas>

<https://www.legambienteveneto.it/pfas-cosa-sono-e-come-incidono-sulla-salute-delluomo/>

<https://www.focus.it/ambiente/ecologia/acqua-e-inquinamento-che-cosa-sono-i-pfas>

<https://www.analisipfas.it/>

[https://epanet22.readthedocs.io/en/latest/2\\_quickstart.html#setting-object-properties](https://epanet22.readthedocs.io/en/latest/2_quickstart.html#setting-object-properties)

<https://www.venetoambientenews.it/2018/05/02/mosav-lautostrada-dellacqua/>



## RINGRAZIAMENTI

Vorrei dedicare un pensiero speciale alla mia relattrice, ing. Claudia Zoccarato. Grazie di cuore per avermi guidato in questo percorso, nonostante i numerosi impegni che la vedevano sempre in movimento. La sua disponibilità e il suo supporto hanno reso questa esperienza unica e indimenticabile.

Un sincero e caloroso grazie va anche all'ing. Ruzza. La sua pazienza e la sua passione hanno reso possibile il completamento di questa tesi. Grazie per aver condiviso con me la sua esperienza e per aver creduto nei miei sforzi.

Un abbraccio speciale e un caro grazie a mio papà e a Michele, ma soprattutto alla mia dolce mamma. Sei la mia roccia, la mia sostenitrice numero uno. La tua fiducia nelle mie potenzialità, anche quando io stessa avevo dei dubbi, è stata la forza che mi ha spinto a non arrendermi. Grazie per essere sempre al mio fianco, per tutte le volte che mi hai ascoltata e sostenuta, e soprattutto per il tantissimo amore che mi doni. Questo traguardo è anche un po' tuo.

Un immenso grazie a voi, mie care socie di avventure accademiche! Bea ed Elsha senza di voi, questo viaggio non sarebbe stato così bello e pieno di risate, e sicuramente un po' meno caotico! Senza di voi, questo percorso sarebbe stato come una tazza di caffè senza caffeina: utile, certo, ma decisamente meno vivace! Ci siamo sostenute a vicenda, in ogni esame, sia che fosse un successone che un disastro totale; il supporto emotivo è stato essenziale. Spero di portare nel mio futuro un po' di quella spensieratezza che abbiamo condiviso, con la certezza che la nostra amicizia è diventata qualcosa di speciale. E infine, grazie per tutti i modi improbabili che abbiamo inventato per affrontare ore e ore di lezioni, siete il motivo per cui ogni esame è stato un po' meno interessante e un po' più memorabile.

Volevo prendere un momento per esprimere il mio grazie di cuore a tutte le ragazze del syncro. Insieme abbiamo vissuto un viaggio incredibile, pieno di esperienze che hanno arricchito la mia vita in modi che non avrei mai potuto immaginare. Ogni allenamento, ogni gara, ogni risata e ogni lacrima ci hanno unite sempre di più, trasformando questa squadra in una vera e propria seconda famiglia. Con voi ho condiviso ansie ed emozioni che solo chi vive questi momenti può capire. Le nostre gioie, dai successi in piscina ai piccoli trionfi, hanno reso ogni sacrificio un'esperienza che non scambierei per nulla al mondo. Siamo uniche, ognuna di noi con le proprie peculiarità, ma insieme siamo invincibili. Tutte voi siete il mio antidoto perfetto allo stress e alla fatica, e sapere di poter contare su di voi è il mio porto sicuro. Grazie per tutti i ricordi indelebili, per ogni abbraccio e per l'energia positiva che portate nella mia vita.

Ci sono momenti nella vita in cui le parole sembrano insufficienti, e questo è uno di quei momenti ma con tutto il mio cuore, voglio dedicare un ringraziamento speciale a Marta. Sei stata molto più di una semplice amica: sei stata la mia migliore amica, la mia compagna di squadra, la mia coinquilina e, in tutte le sue sfumature, la mia compagna di vita. Sei stata per me una fonte inesauribile di supporto, ispirazione e gioia. Abbiamo attraversato insieme momenti indimenticabili, condiviso sogni, sfide e risate, creando ricordi che porterò con me per sempre. Ora, in questo momento di transizione, l'idea di separarci mi fa male al cuore. La nostra quotidianità, le nostre chiacchierate, le avventure e persino le piccole routine casa-università mi mancheranno profondamente. Non importa dove ci porterà la vita, ma porterò sempre con me l'amore e l'affetto che ci uniscono.