



Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Corso di Laurea Magistrale a Ciclo unico in Ingegneria Edile – Architettura

Corso di Costruzioni Idrauliche

Anno Accademico 2022 – 2023

Elaborato 2

Progetto di una rete di distribuzione idrica

Docente

Prof. Ing. Francesco **Pugliese**

Tutor

Ing. Giuseppe **Ascione**

Studenti

Pasquale Maria **Esposito**

Riccardo Maria **Polidoro**

Anna Laura **Rosa**

Sommario

1. Introduzione.....	5
1.1 Parametri di progetto.....	5
1.2 Calcolo delle portate.....	7
1.2.1 Calcolo della portata di punta.....	7
1.2.2 Calcolo della portata antincendio.....	7
1.2.3 Calcolo della portata a rottura.....	8
1.3 Dimensionamento della condotta di avvicinamento.....	8
1.4 Vincoli nella progettazione e nel dimensionamento della rete.....	9
2. Scelta del materiale per le tubazioni.....	9
3. Dimensionamento della rete.....	10
3.1 Metodo delle sconnessioni.....	12
3.1.1 Calcolo delle quote piezometriche nei nodi di immissione ed idraulicamente più sfavorito 12	
3.1.2 Definizione delle sconnessioni e delle portate distribuite nella maglia.....	13
3.2 Criterio economico del Foltz.....	14
4. Verifiche della rete.....	18
4.1 Verifica alla punta.....	19
4.1.1 Definizione dello schema idraulico di riferimento per la verifica.....	19
4.1.2 Applicazione del Metodo di Hardy-Cross e distribuzione effettiva delle portate.....	19
4.1.3 Verifica alla punta.....	22
4.2 Verifica antincendio.....	23
4.2.1 Definizione dello schema idraulico di riferimento per la verifica.....	24
4.2.2 Applicazione del Metodo di Hardy-Cross e distribuzione effettiva delle portate.....	24
4.2.3 Verifica antincendio.....	27
4.3 Verifica a rottura.....	29
4.3.1 Definizione dello schema idraulico di riferimento per la verifica.....	29
4.3.2 Applicazione del Metodo di Hardy-Cross e distribuzione effettiva delle portate.....	30
4.3.3 Verifica a rottura.....	32
5. Verifica in EPANET.....	33
5.1 Verifica alla punta.....	35
5.2 Verifica antincendio.....	36
5.3 Verifica a rottura.....	38
5.3.1 Verifica a rottura del tratto AH.....	39
5.3.2 Verifica a rottura del tratto AB.....	40
5.4 Confronto con le verifiche realizzate col metodo di Cross.....	41
6. Dimensionamento di un impianto idrico sanitario.....	43

6.1	Dimensionamento ai sensi della norma UNI EN 806:2008.....	45
6.2	Dimensionamento ai sensi della norma UNI 9182:2014 – metodo analitico.....	46
7.	Manufatti di appoggio in una rete di distribuzione	49
10.1	Pozzetto di scarico.....	49
10.2	Pozzetto di nodo con scarico	49
10.3	Idranti	49

1. Introduzione

L'elaborato in oggetto verte sul dimensionamento di una rete di distribuzione idrica (acquedotto interno), opera che consente di alimentare le utenze a partire dal serbatoio di stoccaggio, il cui dimensionamento ha costituito l'ultima fase del progetto di cui all'Elaborato 1.

Di norma, da un serbatoio *di testata* – condizione ideale dal punto di vista progettuale e di più frequente applicazione – si dirama una *condotta di avvicinamento* al centro abitato che svolge unicamente servizio di estremità ed è di norma realizzata nello stesso materiale dell'opera di adduzione (in questo caso, acciaio bitumato non saldato). Dalla condotta di avvicinamento l'acqua entra finalmente nella configurazione magliata della rete, che in questo caso è una rete mista, dotata di cinque maglie ed una diramazione in corrispondenza del nodo idraulicamente più sfavorito.

1.1 Parametri di progetto

Per determinare le caratteristiche di riferimento dell'ambito di intervento, sono stati assunti i seguenti parametri:

- **M:** parte intera della media del numero di lettere dei cognomi dei costituenti il gruppo, assunto pari a 7;
- **N:** parte intera della media del numero di lettere dei nomi dei costituenti il gruppo, assunto pari a 7⁽¹⁾;
- **A:** $M/2=3.5$;
- **B:** $N/2=3.5$.

Da detti parametri discendono i dati di progetto riportati di seguito:

- **Popolazione:** 9000 abitanti;
- **Quota di popolazione servita dalla diramazione nel nodo E:** 800 abitanti;
- **Dotazione idrica pro capite:** 254 L/ab/g;
- **Quota di sfioro del serbatoio di testata:** 905 m s.l.m.m.;
- **Lunghezza della condotta di avvicinamento:** 315 m;

Si riportano di seguito i dati geometrici relativi alla rete in oggetto.

¹ Contrariamente alla definizione rigorosa dei parametri, a causa del considerevole valore assunto dal parametro N (pari a 12 in caso di rispetto rigoroso delle indicazioni) si è ritenuto di considerare solo il primo nome di uno dei costituenti del gruppo, determinando il valore indicato.

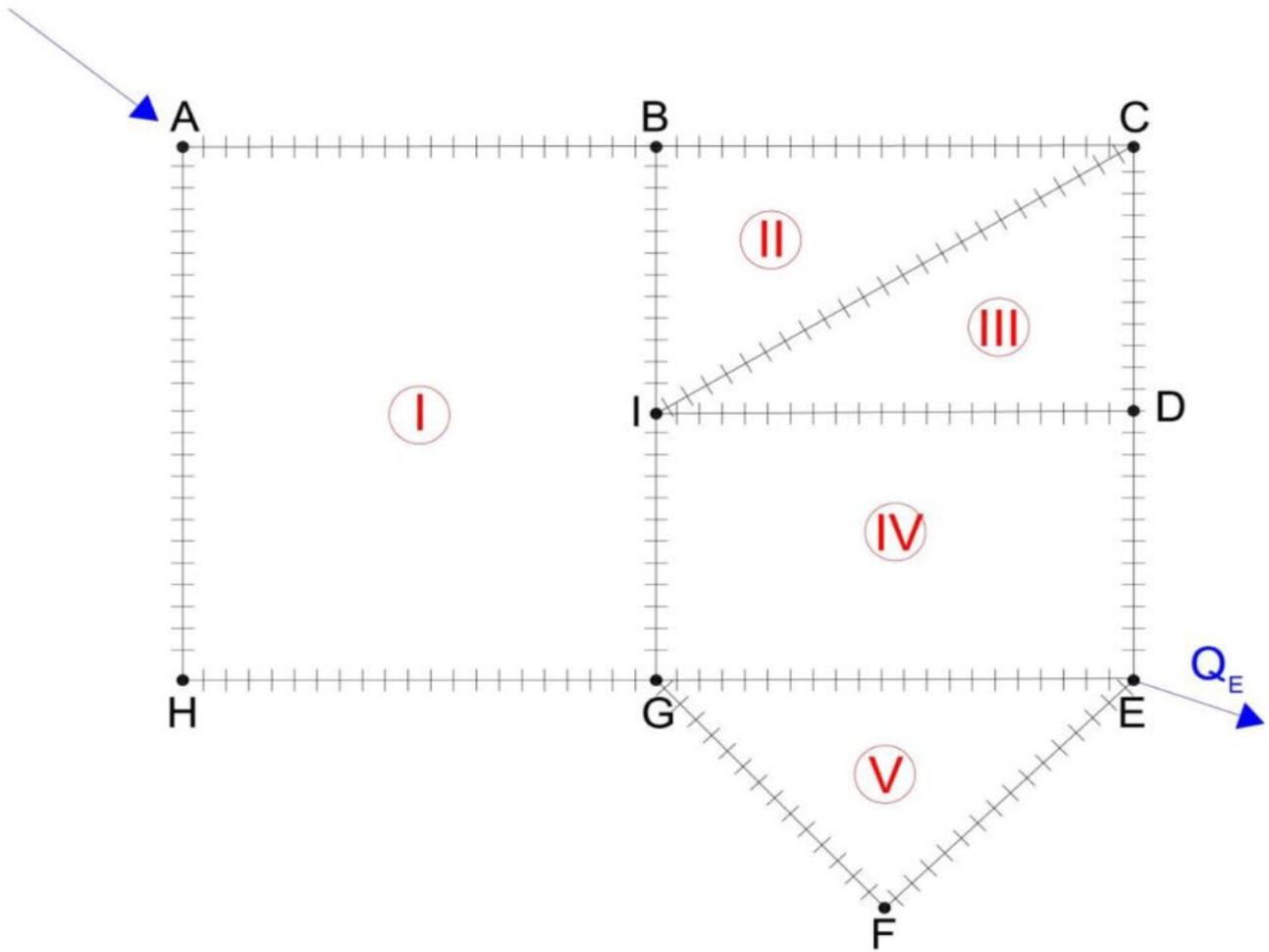


Figura 1: Schema geometrico di distribuzione della rete.

Nodo	Quota terreno (m.s.l.m.m.)
A	853.5
B	851.5
C	852
D	843
E	855.5
F	851.5
G	857
H	846.5
I	845

Tabella 1-2: Quote geodetiche dei nodi.

Lato	Lunghezza (m)
AB	367
BC	175
CD	167
DE	175
EF	227.5
FG	359.5
AH	337.5
GH	364
BI	365
GI	295
CI	277
DI	285
EG	254

Tabella 1-2: Lunghezze dei tratti.

1.2 Calcolo delle portate

A fronte dei dati forniti, prima operazione necessaria per il dimensionamento della rete è stato il calcolo della *portata media*, valore del tutto indicativo rispetto alla variabilità di consumi di una rete ma necessario per il dimensionamento: noto detto valore medio di portata è possibile valutare la portata complessivamente in transito nella condotta di avvicinamento nelle condizioni più gravose per l'impianto, garantendone un dimensionamento efficace.

Come definito nell'*Elaborato 1*, la portata media si ottiene dal prodotto:

$$Q_m = \frac{dot \cdot N_{ab}}{86400}$$

Da cui, nella presente applicazione, si ottiene un valore di 26.46 L/s.

A partire da detto parametro, è possibile valutare la *portata di punta* e la *portata antincendio* transanti nelle rispettive condizioni di esercizio per la rete; il valore più gravoso condiziona il dimensionamento dell'infrastruttura stessa.

1.2.1 Calcolo della portata di punta

Essendo una rete di distribuzione idrica soggetta a notevoli variazioni di portata nel corso della giornata, risulta assolutamente illogico – contrariamente a quanto fatto nell'opera di adduzione – dimensionare l'impianto in ragione di una *portata media*. La valutazione della condizione *ordinariamente più gravosa* di erogazione per la rete, corrispondente alla fascia oraria di punta, si definisce un *coefficiente di punta* c_p , moltiplicativo rispetto alla portata media, desunto da analisi statistiche sul comportamento degli utenti. La valutazione della portata di punta Q_p deriva dunque dall'ipotesi che in detta fascia oraria tutte le erogazioni si incrementino rispetto alla portata media di un'aliquota pari al coefficiente di punta. In particolare, si ha che:

$$c_p = 20 \cdot N_{ab}^{-0.20}$$

$$Q_p = Q_m \cdot c_p$$

In particolare, con i dati desunti in precedenza risulta:

Coeff punta (-)	Qpunta (l/s)
3.24	85.65

1.2.2 Calcolo della portata antincendio

In caso di incendio, è necessario che la rete sia in grado di assicurare una corretta erogazione del servizio fornendo al contempo il carico e la portata necessari per l'attivazione degli idranti; nello specifico, occorre assicurare una pressione minima di 5 m sul solaio di copertura degli edifici e l'erogazione alle utenze pari ad almeno l'80% della portata media giornaliera consentendo allo stesso tempo il regolare esercizio degli idranti, i cui parametri dimensionali derivano dall'applicazione



della *formula del Conti* e la rielaborazione della portata desunta in un valore tecnicamente efficace, come già visto all'*Elaborato 1²*. In definitiva, si ha che:

$$Q_{rete, incendio} = Q_{inc} + 0.80 \cdot Q_m$$

$$Q_{inc} = n_{idranti} \cdot 15 \text{ L/s}$$

$$n = \min \left\{ x : x > \frac{Q^*_{inc}}{15} \right\}$$

$$Q^*_{inc} = 6 \sqrt{N_{ab, migliaia}}$$

E risulta dai dati di progetto che:

Q*inc, Conti (l/s)	Qincendio (l/s)
18	51.17
Nidranti	
2	
Q*incendio (l/s)	
30	

Si osserva dunque che la condizione più gravosa rispetto cui occorre dimensionare la rete è la condizione di punta, con una portata di circa 86 L/s.

1.2.3 Calcolo della portata a rottura

In presenza di una rottura, è imperativo che la rete abbia l'elasticità necessaria per garantire un'efficace erogazione del servizio alle utenze non interessate dall'interruzione di fornitura idrica, garantendo un livello di pressione di almeno 5 m sul solaio di copertura dell'edificio in corrispondenza del nodo idraulicamente più sfavorito in presenza di una portata pari alla portata media giornaliera Q_m . Il dato, non utile ai fini del dimensionamento delle condotte, rappresenta un importante parametro per la verifica della rete in occasione di un simile fenomeno, dovendo assicurare che la rete possa espletare le proprie funzioni in tutte le condizioni di esercizio appena descritte.

1.3 Dimensionamento della condotta di avvicinamento

Come anticipato, in virtù della propria condizione di esercizio la condotta di avvicinamento è progettata in acciaio bitumato non saldato; il relativo dimensionamento dunque dipende dalla formula di resistenza di Scimemi – Veronese. Imponendo una perdita di carico complessiva di 2 m – per non determinare eccessive perdite di carico nella condizione di esercizio della rete rispetto cui ci si occupa di effettuare il dimensionamento – è possibile applicare la formula per determinare, similmente a quanto fatto nell' *Elaborato 1³*, il diametro teorico della tubazione; tramite una verifica delle classi

² P.M. ESPOSITO, R.M. POLIDORO, A.L. ROSA – *Progetto di un'opera di adduzione idrica*. Par. 8.1.3, p. 44.

³ P.M. ESPOSITO, R.M. POLIDORO, A.L. ROSA, *cit.*, Par. 3, pp. 9-10.

diametri disponibili in commercio⁴ si ricava il diametro effettivo della condotta da impiegare e, di conseguenza, le effettive perdite di carico nella condotta.

$$J = c_i \cdot b \left(\frac{Q^\alpha}{D^\beta} \right) \xleftrightarrow[\text{Scimemi - Veronese}]{\text{def}} J = 1.25 \cdot 0.001456 \cdot \frac{Q^{1.82}}{D^{4.71}} \Rightarrow \Delta H = J \cdot L = 1.25 \cdot 0.01456 \cdot \frac{Q^{1.82}}{D^{4.71}} \cdot L$$

$$D_i = \sqrt[4.71]{\frac{1.25 \cdot 0.001456 \cdot Q^{1.82} \cdot L}{\Delta H}}$$

Dai risultati del calcolo emerge che la classe diametrale da considerare per un efficace dimensionamento della condotta è il DN300. Non valendo in una rete l'ipotesi di lunghe condotte, è necessario considerare l'effettivo diametro interno della tubazione nei calcoli, non essendo trascurabile l'approssimazione effettuata nei calcoli per l'opera di adduzione. Si ha quindi che:

Δh_t , avv (m)	D_t avv (m)	D_{comm} avv (m)	Δh_{eff} (m)
2	0.297	0.3097	1.64

1.4 Vincoli nella progettazione e nel dimensionamento della rete

Per garantire un'erogazione efficace del servizio e non determinare un rapido deterioramento dell'infrastruttura, occorre definire alcuni limiti da imporre ai parametri definiti nel calcolo in maniera tale da definire un'infrastruttura tecnicamente efficiente e più rispondente alle esigenze della collettività. In particolare:

- Per evitare che nei punti a quote geodetiche particolarmente ridotte l'erogazione della risorsa idrica avvenga a pressioni eccessive, si definisce un'area di influenza per il serbatoio, dettata da una differenza di quota rispetto alla sua quota di sfioro compresa entro i 70-100 m.
- Per limitare la variazione di pressione agente sulle tubazioni nel corso della giornata, che potrebbe determinare fenomeni di *rottura a fatica* nelle tubazioni, si limita l'oscillazione del cielo piezometrico entro i 20-25 m⁵.
- Per garantire un'erogazione efficace a tutti i livelli degli edifici di altezza corrispondente all'altezza media dettata dalle vigenti norme urbanistiche, la linea piezometrica di massimo consumo deve trovarsi almeno 5-10 m al di sopra della quota del solaio di copertura.

2. Scelta del materiale per le tubazioni

Ad eccezione della condotta di avvicinamento, si prevede che le tubazioni componenti la rete siano realizzate in ghisa sferoidale conformi alla norma UNI EN 545/2007, con rivestimento interno in malta

⁴ Ci si è riferiti al catalogo OPPO riportato al Par. 3 del citato Elaborato 1.

⁵ Per soddisfare detta condizione, ci si è occupati di verificare che la differenza di carico tra il nodo di immissione e il carico minimo da garantire al nodo idraulicamente più sfavorito fosse compresa entro i 25 m, imponendo detto valore nel caso in cui detta verifica non dovesse essere soddisfatta.



cementizia d'altoforno centrifugata ed un rivestimento esterno con strato di zinco (200 g/m²) e vernice acrilica acquacoat⁶.

Nelle applicazioni tecniche, la giunzione più diffusa per detta tipologia di tubazioni è il giunto a bicchiere di tipo *rapido*, in cui la tenuta è garantita dall'accoppiamento per compressione radiale dell'elastomero posto all'interno del bicchiere e avente terminazione a coda di rondine per sfruttare la pressione interna dell'acqua come *sollecitazione partecipante* alla forza attritiva della guarnizione, che spinge sul bicchiere e sulla tubazione ad esso connessa. Con tale tecnologia si assicura inoltre una ridotta suscettibilità della tubazione all'attacco radicale, in virtù dell'elevata tenuta (detto fenomeno è ulteriormente mitigato dal forte spessore delle tubazioni in ghisa).

La scelta del materiale è stata influenzata dalle seguenti caratteristiche proprie delle tubazioni in ghisa, ritenute particolarmente rispondenti alle esigenze progettuali:

- Lunghezza delle canne nell'ordine di 6 m, compatibile con le variazioni plano-altimetriche di un tracciato urbano⁷;
- Minor suscettività alla corrosione in virtù dello spessore maggiore rispetto all'acciaio⁸;
- Elevata disponibilità di pezzi speciali nel medesimo materiale⁹.

Ne segue che la formula di resistenza di riferimento per il calcolo delle perdite di carico in rete è la *formula monomia di Darcy*:

$$J = c_i \cdot b \left(\frac{Q^\alpha}{D^\beta} \right) \xleftrightarrow[\text{Darcy}]{\text{def}} J = 2 \cdot \left(0.00164 + \frac{0.000042}{D} \right) \cdot \left(\frac{Q^2}{D^5} \right) \Rightarrow \Delta H = 2 \cdot \left(0.00164 + \frac{0.000042}{D} \right) \cdot \left(\frac{Q^2}{D^5} \right) \cdot L$$

3. Dimensionamento della rete

Il dimensionamento di una rete chiusa non può essere condotto con un approccio e con formulazioni *classiche*: l'indeterminazione algebrica del sistema di classi diametrali è sensibilmente elevata. Fissata la portata rispetto cui dover dimensionare l'impianto – definita al *paragrafo 1.2* – sono noti infatti:

- Coefficienti di scabrezza delle tubazioni (materiale utilizzato noto);
- Lunghezze dei lati della rete (dati geometrici della rete noti);
- Entità delle erogazioni distribuite e concentrate in riferimento alla condizione di funzionamento considerata (dati sulla popolazione e sul consumo di risorsa idrica noti).

Definiti n come numero di nodi nella rete ed L numero di tratti che collegano i nodi, sono ignoti:

- L diametri degli L tronchi della rete;

⁶ La verniciatura esterna assume colorazione azzurra per permettere l'identificazione delle tubazioni della rete in fase di manutenzione.

⁷ Ciò consente di realizzare l'infrastruttura idrica in sovrapposizione con i principali assi viari, garantendo una minima occupazione di suoli privati ed un più facile accesso alle tubazioni in caso di manutenzione.

⁸ A differenza dell'opera di adduzione, la rete idrica è immersa in un ambiente ad elevata densità di tensioni elettriche vaganti ed altri agenti corrosivi, in virtù delle applicazioni strutturali, infrastrutturali ed urbanistiche tipiche in un ambiente urbano.

⁹ Essendo una rete dotata di numerose variazioni plano-altimetriche di varia entità, è fondamentale garantire un'elevata compatibilità tra canne e pezzi speciali per consentire un funzionamento efficiente.

- $n-1$ quote piezometriche nei nodi¹⁰;
- $L-1$ portate defluenti nei tratti della rete¹¹.

Si determinano dunque $2L+n-2$ incognite, a fronte di $n-1$ equazioni di continuità nei nodi linearmente indipendenti¹² ed $L-1$ equazioni del moto indipendenti¹³. Per rendere il sistema determinato sono necessarie altre L relazioni, definibili attraverso l'introduzione di un *criterio di appoggio* di natura economica sui diametri complementare per il dimensionamento.

Il criterio appena menzionato, detto *criterio di dimensionamento del Foltz*, correla la variazione di costo delle tubazioni alla variazione del loro diametro nominale – che, nel caso di tubazioni in ghisa grigia e, per buona approssimazione, sferoidale, coincide con il diametro interno – ovvero indirettamente alle perdite di carico all'interno del condotto stesso.

Il metodo presuppone l'inserimento di m *sconnessioni virtuali* (con m coincidente con il numero di maglie) per trasformare la configurazione chiusa della rete in una sovrapposizione di geometrie aperte, realizzando dei percorsi con una netta identificazione di punti iniziali e finali sezionati tramite delle *saracinesche virtuali*. Ipotizzare una sconnessione in un punto implica imporre che la portata sia nulla in detta sezione; ne segue che, essendo nota la portata in corrispondenza della sconnessione, è possibile identificare le portate in ogni tratto applicando le equazioni di continuità, essendo note le portate da erogare alle utenze.

In particolare, bisogna inserire $k-1$ sconnessioni in prossimità del nodo idraulicamente più sfavorito (con k pari al numero di tratti convergenti in esso); le sconnessioni restanti si dispongono rispettando due criteri:

- Preservare l'anello più esterno della rete;
- Applicare il *criterio di minima resistenza idraulica* nei tratti interni.

Una volta definito il singolo percorso è possibile determinarne le portate di estremità – di conseguenza, le portate equivalenti associate – applicando l'equazione di continuità.

Ipotizzando che i costi delle tubazioni crescano linearmente nel tempo e che le leggi di resistenza adottate abbiano formula monomia, è possibile introdurre delle *equazioni di minimo costo*, scritte nella forma $\sum_i H_i = H = c \cdot \sum_i L_i \sqrt[3]{Q_{eq,i}}$, in cui la costante di proporzionalità c , diversa per ogni percorso, può essere determinata osservando che la perdita totale di carico nel percorso è nota, essendo pari alla differenza tra la quota piezometrica nel nodo di origine assegnata – ad esempio, la quota piezometrica del nodo di immissione in rete – e la quota nel nodo di destinazione determinabile imponendo che sia garantita l'alimentazione idrica ad un'ipotetica utenza posta all'ultimo livello di un edificio in corrispondenza della sezione considerata.

Ne risultano delle classi diametrali compatibili con le perdite di carico identificate nei singoli percorsi; dai *diametri teorici* si passa alle classi diametrali effettivamente selezionate attraverso una procedura

¹⁰ La quota piezometrica nel nodo di immissione A è nota, essendo desumibile dal calcolo delle perdite di carico nella condotta di avvicinamento.

¹¹ È logicamente nota la portata entrante nel nodo di immissione; le due portate uscenti da esso sono tra loro dipendenti.

¹² L'equazione di continuità nell'ultimo nodo considerato è infatti linearmente dipendente dalle restanti, traducendosi in un'identità.

¹³ La condizione è analoga a quanto detto per le equazioni di continuità.



di *ritocco dei diametri*, consentendo la progettazione di un impianto tecnicamente realizzabile ed economicamente sostenibile. Tale procedura prevede il rispetto dei seguenti criteri:

- Classe diametrale minima DN80, per consentire l'allaccio delle apparecchiature dei Vigili del Fuoco;
- Minimizzare il numero complessivo di classi diametrali utilizzate (nei piccoli centri urbani, mantenersi entro 3-4 classi), riducendo parallelamente il salto tra classi diametrali successive per non determinare significative perdite di carico;
- Applicare un criterio gerarchico per il quale le classi diametrali utilizzate si riducono o al più restano costanti all'avvicinarsi al punto idraulicamente più sfavorito.

Una volta definiti i diametri è possibile analizzare le condizioni di esercizio della rete al variare delle fasce orarie di consumo: i punti in cui erano presenti le sconnessioni virtuali diventano in prima battuta dei *punti di inversione del flusso* (o sono prossimi ad essi); si attuano poi le dovute operazioni di verifica della rete nelle convenzionali condizioni di funzionamento di riferimento. Le verifiche consistono nella determinazione delle portate defluenti lungo i lati e delle quote piezometriche nei nodi della rete nella configurazione esaminata, che devono soddisfare le esigenze delle utenze come definito al *paragrafo 1.2*.

3.1 Metodo delle sconnessioni

Il metodo ha per finalità la definizione di una *distribuzione congruente di portate*; rispettando i parametri definiti in precedenza si osserva la determinazione all'interno della maglia in oggetto di due *percorsi principali* (che collegano il nodo di immissione al nodo idraulicamente più sfavorito), con i restanti percorsi secondari. Ciascun percorso può essere valutato come uno *schema consortile*¹⁴, in maniera tale da definire le quote piezometriche nei nodi, dunque le classi diametrali teoriche di riferimento.

3.1.1 Calcolo delle quote piezometriche nei nodi di immissione ed idraulicamente più sfavorito

Nota la quota di sfioro del serbatoio e calcolate le perdite di carico nella condotta di avvicinamento, la determinazione del carico nel nodo A si effettua attraverso l'applicazione della formula di resistenza di Scimemi-Veronese.

Occorre definire, in questa fase e per la corretta prosecuzione delle successive, il nodo idraulicamente più sfavorito della rete: tra tutti, risulta che i nodi E ed F presentano la maggior distanza dal nodo di immissione, presentandosi come ideali candidati a tale determinazione. Osservando che il nodo E presenta una quota geodetica superiore rispetto a quella del nodo A ed osservando che detto nodo presenta anche la diramazione puntuale verso gli 800 abitanti restanti, si intuisce che esso è il nodo nella condizione più svantaggiosa per la rete.

Il calcolo della quota piezometrica da garantire nel nodo E si effettua considerando il carico minimo necessario per servire un'utenza ideale posta all'ultimo livello di un edificio servito dal nodo stesso:

$$H_{E, \min} = z_e + H_{edifici} + \Delta H_{montante} + H_{res}$$

¹⁴ Il percorso AB, ad esempio, può essere valutato come un percorso tra due serbatoi aventi quote di sfioro pari alle quote piezometriche nei nodi.

In cui z_e è la quota geodetica nel nodo, $H_{edifici}$ l'altezza media dell'edificio (12 m), $\Delta H_{montante}$ le perdite di carico in un'ordinaria colonna montante di un edificio (nell'ordine dei 2 m) e H_{res} il carico residuo da garantire sul solaio di copertura, di almeno 5 m.

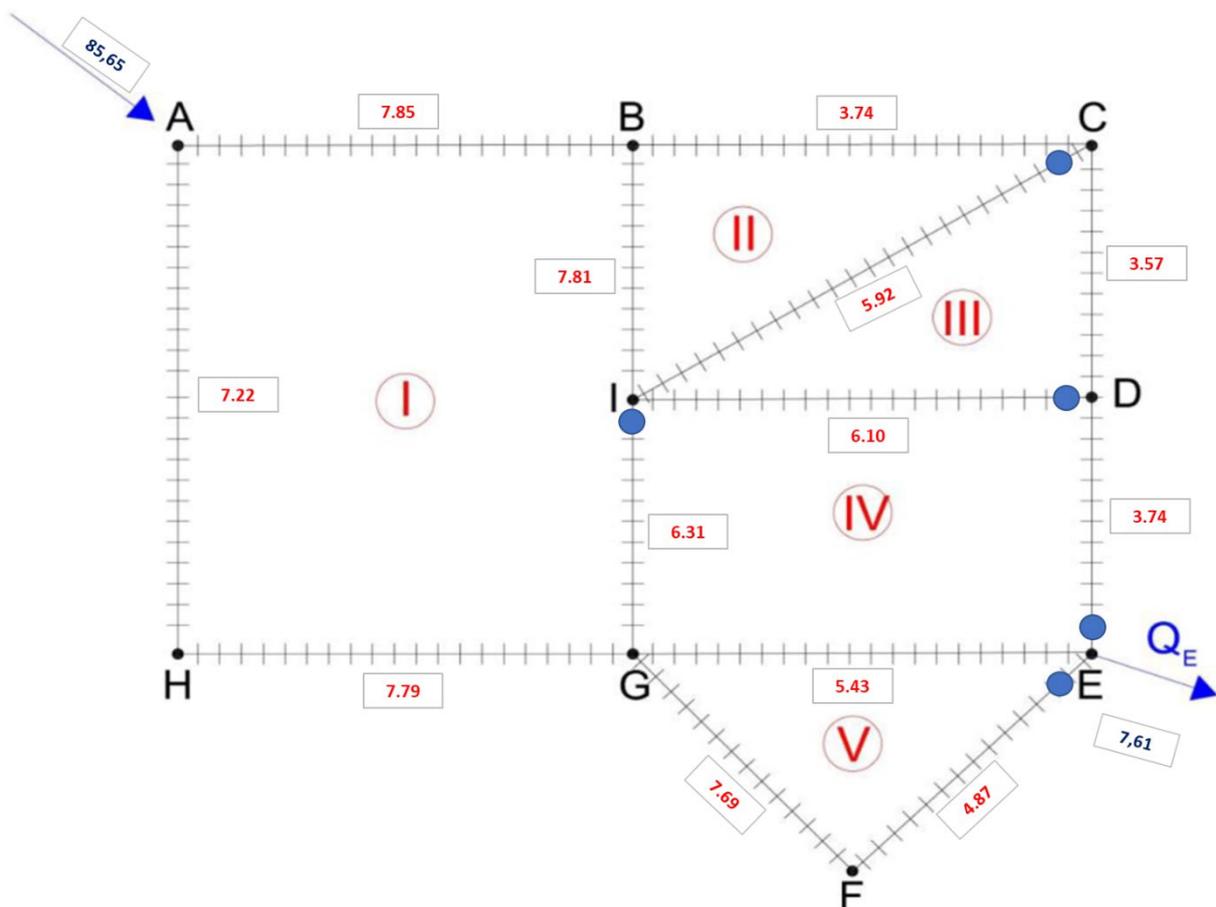
Nella fascia oraria di punta, di riferimento per il dimensionamento, la rete è attraversata dalla massima portata (presentando le massime ΔH e le minime pressioni); poiché un'eccessiva variabilità di portata – dunque di linea piezometrica – nel corso della giornata implica lesioni e perdite, in particolar modo nelle giunzioni in prossimità del nodo idraulicamente più sfavorito, più suscettibile alle perdite di carico, si impone da progetto un valore massimo di oscillazione tra le piezometriche di 20-25m (all'incirca pari alle perdite di carico tra il nodo di immissione e quello idraulicamente più sfavorito). Ne segue che il carico minimo effettivo da garantire al nodo E è pari al massimo tra il carico calcolato per assicurare la corretta erogazione alle utenze e il carico nel nodo di immissione decurtato di 25 m.

Dal calcolo si ottiene quindi che, applicando le relazioni descritte:

HA (m.s.l.m.m.)	HE min (m.s.l.m.m.)	ΔH A-E (m)
903.365	878.365	25

3.1.2 Definizione delle sconnessioni e delle portate distribuite nella maglia

Si riportano di seguito le sconnessioni considerate per il dimensionamento secondo il criterio del Foltz con i valori di portata distribuita nei tratti in condizione di punta, espressi in L/s.





Le portate distribuite sono state valutate come prodotto tra una portata di punta unitaria – definita decurtando dalla portata di punta immessa nel nodo A l'aliquota concentrata da erogare nel nodo E e rapportando il valore ottenuto alla somma delle lunghezze dei tratti della maglia – e le lunghezze dei singoli tratti, ipotizzando una distribuzione uniforme della popolazione nella rete. Per determinare le portate distribuite nelle condizioni di esercizio restanti, utili per la determinazione di una distribuzione congruente di portate che consenta un efficace procedimento nelle operazioni di verifica, è stato adottato un procedimento analogo. Si riportano di seguito i dati relativi al calcolo delle portate unitarie:

Qm (l/s)	Coeff punta (-)	Qpunta (l/s)	Q*inc, Conti (l/s)	Qincendio (l/s)	Qpunta, E (l/s)	Qpunta, rete (l/s)	Somma L (m)	qu, p (l/s/m)	qu, medio (l/s/m)	qu inc (l/s/m)
26.46	3.24	85.65	18	51.17	7.61	78.04	3648.50	0.02	0.01	0.01

Tabella 3-1: Calcolo delle portate unitarie q_u nelle diverse condizioni di funzionamento.

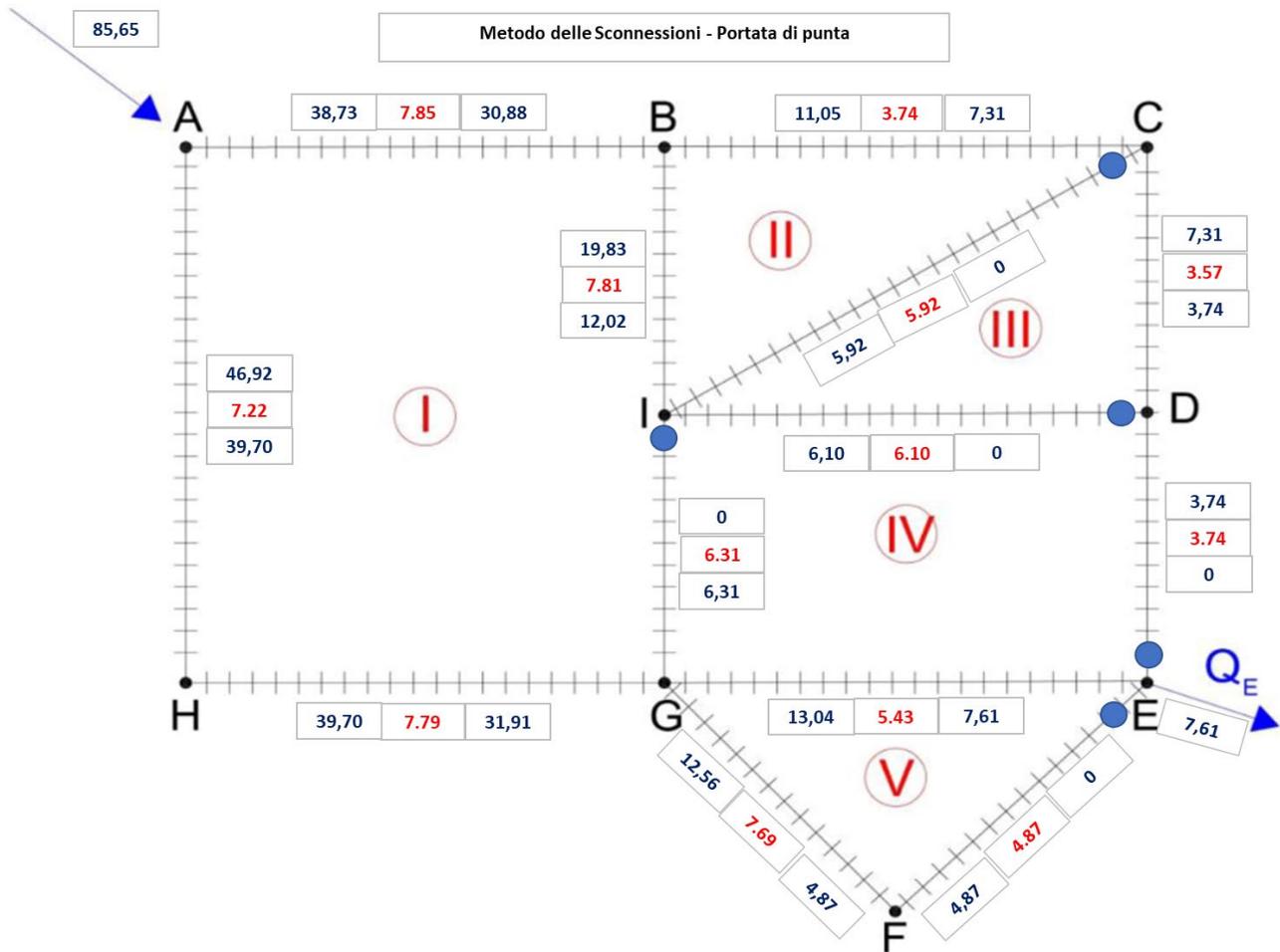
Circa le portate distribuite nei tratti, si ottiene che:

Lato	Lunghezza (m)	qdist p (l/s)	qdist m (l/s)	qdist inc (l/s)
AB	367	7.85	2.42	1.94
BC	175	3.74	1.16	0.93
CD	167	3.57	1.10	0.88
DE	175	3.74	1.16	0.93
EF	227.5	4.87	1.50	1.20
FG	359.5	7.69	2.38	1.90
AH	337.5	7.22	2.23	1.78
GH	364	7.79	2.41	1.92
BI	365	7.81	2.41	1.93
GI	295	6.31	1.95	1.56
CI	277	5.92	1.83	1.46
DI	285	6.10	1.88	1.51
EG	254	5.43	1.68	1.34

Tabella 3-2: Portate distribuite nei tratti della rete nelle diverse condizioni di funzionamento.

3.2 Criterio economico del Foltz

Applicando il metodo delle sconnessioni, si calcolano le portate in ingresso ed uscita dai nodi, definite nello schema di seguito ed espresse in L/s. Il verso del flusso d'acqua risulta evidente nei singoli tratti in quanto, attesa l'erogazione alle utenze schematizzata sotto forma di portata distribuita, la portata diminuisce progressivamente lungo i singoli percorsi.



Note le portate distribuite, in ingresso e in uscita nei singoli tratti, è possibile calcolare le *portate equivalenti* dei tronchi, valori teorici di portata che consentono di estendere il campo di applicabilità delle classiche formule di resistenza¹⁵ a tronchi che svolgono servizio di estremità e di erogazione distribuita lungo il percorso. Detta portata è un valore univoco tale da definire a parità di caratteristiche geometriche del tratto le medesime perdite di carico del tronco originario con una schematizzazione del funzionamento come funzionamento unicamente di estremità. Nelle tubazioni in ghisa sferoidale, la portata equivalente si calcola come $Q_{eq} = Q_{uscente} + \frac{q_d}{\sqrt{3}}$.

Come anticipato, applicando il criterio economico del Foltz ad un singolo percorso, il suo schema idraulico si trasforma in uno schema serbatoio-serbatoio con erogazioni distribuite nei tratti interessati dal percorso ed erogazioni concentrate in corrispondenza dei nodi intermedi. Sapendo che, in un singolo percorso:

$$\Delta H_i = c \cdot Q_{eq}^{1/3} \cdot L_i \Leftrightarrow \sum_i^L \Delta H_i = c \cdot \sum_i^L Q_{eq,i}^{1/3} \cdot L_i$$

¹⁵ Che si ricordano essere applicabili unicamente ai tronchi in grado di svolgere solo servizio di estremità.



Essendo noti o conoscibili Q_{eq} , L_i , ΔH_{tot} , è possibile calcolare il coefficiente economico c di ciascun percorso dalla seconda formula – considerando la perdita di carico totale tra i nodi di estremità dello stesso – per poi inserirlo nella prima e determinare le perdite di carico nei singoli tratti dello schema. Note le ΔH_i , essendo note le quote piezometriche dei nodi di estremità, è possibile identificare il carico in ogni nodo del percorso. Poiché la determinazione delle quote piezometriche dei nodi a monte dei percorsi secondari dipende dal calcolo delle quote piezometriche nei nodi intermedi dei percorsi principali, il procedimento prevede di effettuare il calcolo prima nei percorsi principali, in maniera tale da poter operare linearmente nelle valutazioni.

Una volta note le perdite di carico nei singoli tratti, inoltre, è possibile applicare la formula di resistenza di Darcy – nota la portata equivalente – per determinare il diametro teorico alla base del dimensionamento; una volta convertito detto diametro nel corrispondente diametro commerciale è possibile operare nella procedura di ritocco delle classi diametrali. In particolare, si ha:

$$\Delta H_i = \frac{2\beta}{D_i^5} Q_{eq, i}^2 L_i \Rightarrow D_i = \sqrt[5]{\frac{2\beta \cdot Q_{eq, i}^2 L_i}{\Delta H_i}}, \text{ con } \beta = \left(0.00164 + \frac{0.000042}{D}\right)$$

Si riportano di seguito i calcoli effettuati, con diametro teorico valutato per tentativi – sfruttando la funzione ricerca obiettivo di Excel – imponendo che le perdite di carico definite nel criterio di Foltz siano pari a quelle valutate attraverso la formula di Darcy.

Metodo di Foltz										
	L (m)	qd p (l/s)	Qfin (l/s)	Qeq (l/s)	Qeq ^{1/3} *L	ΔH (m)	D teor (m)	ΔH Darcy (m)	ΔΔH	DN
AB	367	7.85	30.88	35.41	120.52	14.34	0.16	14.34	0.0000	200
BC	175	3.74	7.31	9.47	37.03	4.40	0.11	4.40	-0.0001	125
CD	167	3.57	3.74	5.80	30.01	3.57	0.09	3.57	-0.0001	100
DE	175	3.74	0.00	2.16	22.63	2.69	0.07	2.69	0.0010	80
c1	HB	HC	HD	HE						
	(-)	(m.s.l.m.m.)	(m.s.l.m.m.)	(m.s.l.m.m.)	(m.s.l.m.m.)					
	0.12	889.03	884.63	881.06	878.36					
	L (m)	qd p (l/s)	Qfin (l/s)	Qeq (l/s)	Qeq ^{1/3} *L	ΔH (m)	D teor (m)	ΔH Darcy (m)	ΔΔH	DN
AH	337.5	7.22	39.70	43.87	119.03	10.06	0.19	10.06	-0.0001	200
GH	364	7.79	31.91	36.41	120.64	10.20	0.18	10.20	-0.0009	200
EG	254	5.43	7.61	10.75	56.05	4.74	0.12	4.74	0.0000	125
c2	HH	HG	HE							
	(-)	(m.s.l.m.m.)	(m.s.l.m.m.)	(m.s.l.m.m.)						
	0.08	893.30	883.10	878.36						
	L (m)	qd p (l/s)	Qfin (l/s)	Qeq (l/s)	Qeq ^{1/3} *L	ΔH (m)	D teor (m)	ΔH Darcy (m)	ΔΔH	DN
FG	359.5	7.69	4.87	9.31	75.63	3.33	0.13	3.33	0.0003	150
EF	227.5	4.87	0.00	2.81	32.10	1.41	0.09	1.41	0.0009	100
c3	HF	HE								
	(-)	(m.s.l.m.m.)	(m.s.l.m.m.)							
	0.04	879.78	878.36							
	L (m)	qd p (l/s)	Qfin (l/s)	Qeq (l/s)	Qeq ^{1/3} *L	ΔH (m)	D teor (m)	ΔH Darcy (m)	ΔΔH	DN
BI	365	7.81	12.02	16.53	92.97	5.44	0.15	5.44	-0.0002	150
DI	285	6.10	0.00	3.52	43.35	2.54	0.09	2.54	0.0000	100
c4	HI	HD								
	(-)	(m.s.l.m.m.)	(m.s.l.m.m.)							
	0.06	883.59	881.06							
	L (m)	qd p (l/s)	Qfin (l/s)	Qeq (l/s)	Qeq ^{1/3} *L	ΔH (m)	D teor (m)	ΔH Darcy (m)	ΔΔH	DN
CI	277	5.92	0.00	3.42	0.32	1.03	0.11	1.03	0.0001	125
GI	295	6.31	0.00	3.64	0.36	0.49	0.13	0.49	-0.0003	125

Tabella 3-3: Calcolo del carico nei nodi e dei diametri teorici della rete. Si osservi in particolare la distinzione tra i percorsi principali ABCDE - AHGE e secondari GFE - BID - IC - GI; gli ultimi due valutati per semplice applicazione della formula di Darcy.

Come già descritto nei paragrafi precedenti, noti i diametri teorici è possibile ricavare i corrispondenti diametri commerciali e, attraverso la procedura di ritocco dei diametri descritta in precedenza, definire i diametri effettivi della rete, ultimando il dimensionamento e consentendo un calcolo delle effettive aliquote di carico nei nodi. Si riportano di seguito i calcoli relativi al dimensionamento della rete, con la valutazione conseguente delle effettive quote piezometriche nei nodi.

Lato	Lunghezza (m)	qdist p (l/s)	qdist m (l/s)	qdist inc (l/s)	DN,t (mm)	DN,ritocco (mm)	ΔH (m)
AB	367.00	7.85	2.66	2.13	200	200	5.32
BC	175.00	3.74	1.27	1.02	125	125	2.03
CD	167.00	3.57	1.21	0.97	100	125	0.73
DE	175.00	3.74	1.27	1.02	80	125	0.11
EF	227.50	4.87	1.65	1.32	100	125	0.23
FG	359.50	7.69	2.61	2.09	150	150	1.58
AH	337.50	7.22	2.45	1.96	200	200	7.51
GH	364.00	7.79	2.64	2.11	200	200	5.58
BI	365.00	7.81	2.65	2.12	150	150	5.04
GI	295.00	6.31	2.14	1.71	125	125	0.51
CI	277.00	5.92	2.01	1.61	125	125	0.42
DI	285.00	6.10	2.07	1.65	100	125	0.46
EG	254.00	5.43	1.84	1.47	125	125	3.80

Tabella 3-5: Diametri commerciali, ritocco dei diametri e calcolo delle effettive perdite di carico nei tratti in condizioni di punta. Si osservi come nella procedura di ritocco è stata eliminata la classe diametrica DN100, per limitare il salto tra classi diametriche e minimizzare il numero di classi utilizzate.

Nodo	Quota terreno (m s.l.m.m.)	Quota piezometrica effettiva (m s.l.m.m.)	Quota piezometrica Dt (m s.l.m.m.)
A	853.50	903.36	903.36
B	851.50	898.04	889.03
C	852.00	896.01	884.63
D	843.00	895.28	881.06
E	855.50	895.18	878.36
F	851.50	895.41	879.78
G	857.00	896.98	883.10
H	846.50	895.85	893.30
I	845.00	893.00	883.59

Tabella 3-4: Calcolo delle quote piezometriche.

Essendo stata dimensionata la rete, è possibile procedere nelle ordinarie verifiche della rete nei suoi stati di funzionamento critici.



4. Verifiche della rete

Il dimensionamento della rete, effettuato rispetto alla portata più gravosa tra le condizioni di punta e di incendio nel nodo idraulicamente più sfavorito, si conclude con l'operazione di ritocco di diametri – che logicamente modifica la distribuzione delle portate rispetto a quanto ipotizzato dal metodo delle sconnessioni – e non permette una valutazione del comportamento dell'infrastruttura nelle sue condizioni di esercizio.

Tra i metodi di verifica possibili, è stato utilizzato il *metodo di Hardy – Cross* che, assegnato un verso *convenzionale positivo* ad ogni maglia, numerate le maglie, definita una distribuzione congruente di portate – ad esempio attraverso l'applicazione del metodo delle sconnessioni – e noti i dati geometrici e caratteristici di ogni tubazione, consente attraverso l'applicazione iterativa¹⁶ di una *portata correttiva* ad ogni maglia di definire in buona approssimazione l'unica distribuzione di portate *congruente*¹⁷ ed *equilibrata*¹⁸ della rete. Una volta definita la distribuzione di portate effettiva è possibile valutare il carico effettivo in ogni nodo, secondo il principio per cui l'acqua si muove naturalmente da un punto a quota piezometrica maggiore ad uno a quota piezometrica minore. Noti detti valori, è possibile verificare – atteso il soddisfacimento delle portate richieste dalle utenze – la congruità delle condizioni di carico rispetto alla richiesta minima da garantire, determinando l'esito della verifica.

Al termine della procedura iterativa è possibile che emergano dei punti di inversione del moto in alcuni tratti; in tal caso occorre identificare l'effettiva posizione del punto all'interno del tratto¹⁹ e condurre le operazioni di verifica anche nei punti suddetti, ordinariamente aventi quota piezometrica inferiore rispetto ai nodi di estremità.

Per l'attuazione del *Metodo*, computazionalmente oneroso, è stato utilizzato un apposito applicativo Excel²⁰ che consente di automatizzare il processo iterativo una volta inseriti degli appositi dati di input (lunghezza e diametro delle tubazioni, portata distribuita nel tratto, portata iniziale del tratto in relazione al verso di percorrenza convenzionale assunto, posizionamento del tratto in relazione alle maglie adiacenti attraverso i parametri $M+$ ed $M-$), avendo cura di specificare il verso delle portate iniziali rispetto al verso convenzionale imposto.

¹⁶ Il bilanciamento di una maglia implica lo sbilanciamento delle maglie adiacenti, in virtù della modifica della portata defluente nel lato in comune tra le maglie.

¹⁷ Distribuzione di portate tale da rispettare la continuità nei nodi e nei tratti.

¹⁸ Distribuzione di portate tale da rispettare il bilancio di energia di ogni maglia della rete, tale per cui la sommatoria delle perdite di carico in ogni lato della maglia è nulla per ogni maglia – condizione necessaria per definire univocamente il carico in ogni nodo, indipendentemente dal percorso effettuato.

¹⁹ Note le portate in ingresso nel tratto e la portata distribuita, la sezione corrispondente al punto di inversione del moto è calcolabile come rapporto tra il prodotto tra una portata in ingresso e la lunghezza del tratto e la portata distribuita complessiva nel tratto stesso.

²⁰ Applicativo sviluppato all'interno del DICEA, fornito agli studenti per la presente esercitazione.

4.1 Verifica alla punta

Nella verifica alla punta ci si occupa di verificare la corretta erogazione del servizio nella fascia oraria di punta, garantendo almeno 5-10 m (in questa applicazione 10 m) di carico sul solaio di copertura dell'edificio. In ciascun nodo e nei punti di inversione del flusso occorre verificare che:

$$H_i \geq H_{i, \min} = z_i + H_{edif.} + \Delta H_{c.m.} + H_{res}$$

4.1.1 Definizione dello schema idraulico di riferimento per la verifica

Applicando il metodo delle sconnessioni, è stata determinata la seguente distribuzione congruente di portate:

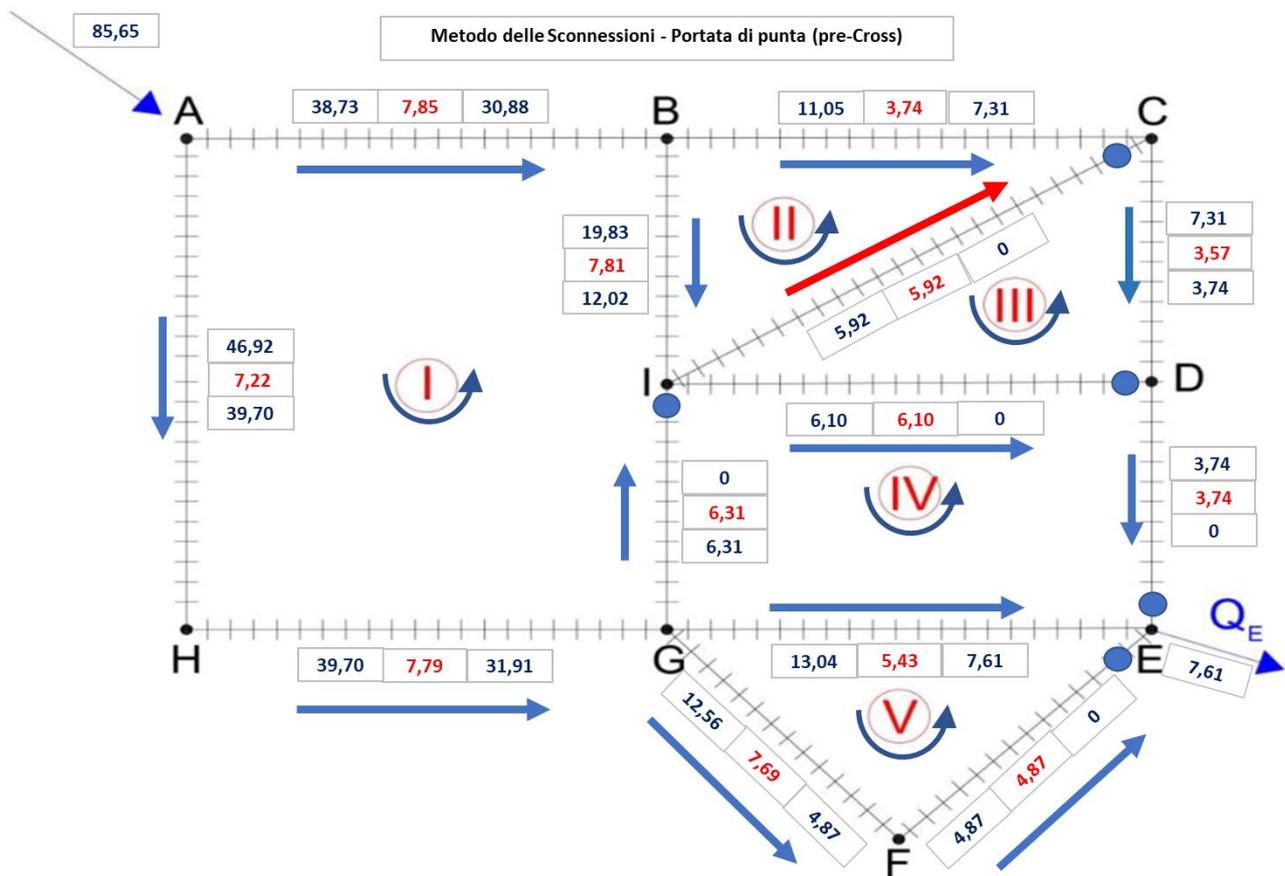


Figura 2: Distribuzione congruente di portate per la verifica alla punta. Si osservi in particolare il verso di percorrenza assunto nel tratto CI, opposto rispetto a quello determinato al termine dell'operazione di dimensionamento (in base alle differenti quote piezometriche nei nodi) ma congruente con la distribuzione individuata.

4.1.2 Applicazione del Metodo di Hardy-Cross e distribuzione effettiva delle portate

Avendo numerato ed orientato le maglie è possibile procedere nel metodo ed impiegare l'applicativo Excel fornito. Si riportano di seguito i dati immessi nel programma e i risultati ad essi associati.



Dati per excel Cross							Dati ottenuti		
ID Lato (-)	L (m)	D (m)	qd (L/s)	Qiniziale (L/s)	M+ (-)	M- (-)	R (-)	Qiniz,eff (L/s)	ΔH,eff (m)
AB	367.00	0.200	7.85	-30.88	1	0	4243.44	-34.73	-6.36
BI	365.00	0.150	7.81	-12.02	1	2	18457.28	-11.30	-4.36
GI	295.00	0.125	6.31	6.31	1	4	38202.25	5.35	0.31
GH	364.00	0.200	7.79	39.7	1	0	4208.75	35.85	4.32
AH	337.50	0.200	7.22	46.92	1	0	3902.34	43.07	6.09
BC	175.00	0.125	3.74	-7.31	2	0	22662.35	-11.88	-4.31
CI	277.00	0.125	5.92	5.92	2	3	35871.26	2.53	-0.05
CD	167.00	0.125	3.57	-3.74	3	0	21626.36	-4.92	-1.00
DI	285.00	0.125	6.10	6.1	3	4	36907.25	7.81	0.95
DE	175.00	0.125	3.74	0	4	0	22662.35	-2.89	-0.54
EG	254.00	0.125	5.43	13.04	4	5	32892.78	9.94	1.80
FG	359.50	0.150	7.69	12.56	5	0	18179.16	12.76	1.54
EF	227.50	0.125	4.87	4.87	5	0	29461.05	5.07	0.26

Tabella 4-1: Dati di input e output per la verifica in condizioni di punta dell'applicativo Excel.

Si ottengono dunque i seguenti valori di carico nei nodi, espressi in metri. Avendo tutti i dati effettivi della rete a disposizione, è possibile definire l'effettiva distribuzione delle portate nella rete, riportata di seguito. In particolare, le portate distribuite (in rosso) e in ingresso/uscita rispetto ai nodi (in blu) sono espresse in L/s, mentre le quote piezometriche nei nodi (in verde) sono espresse in metri.

Nodo	Hdimens (m s.l.m.m.)	Heff (m s.l.m.m.)
A	903.36	903.36
B	898.04	897.00
C	896.01	892.69
D	895.28	891.69
E	895.18	891.15
F	895.41	891.42
G	896.98	892.95
H	895.85	897.27
I	893.00	892.64

Tabella 4-2: Carico nei nodi dal dimensionamento ed effettivo in condizioni di punta. Si osservi in particolare come – a differenza di quanto ricavato in fase di dimensionamento – il nodo idraulicamente più sfavorito in condizioni di punta sia effettivamente il nodo E, e non il nodo D.

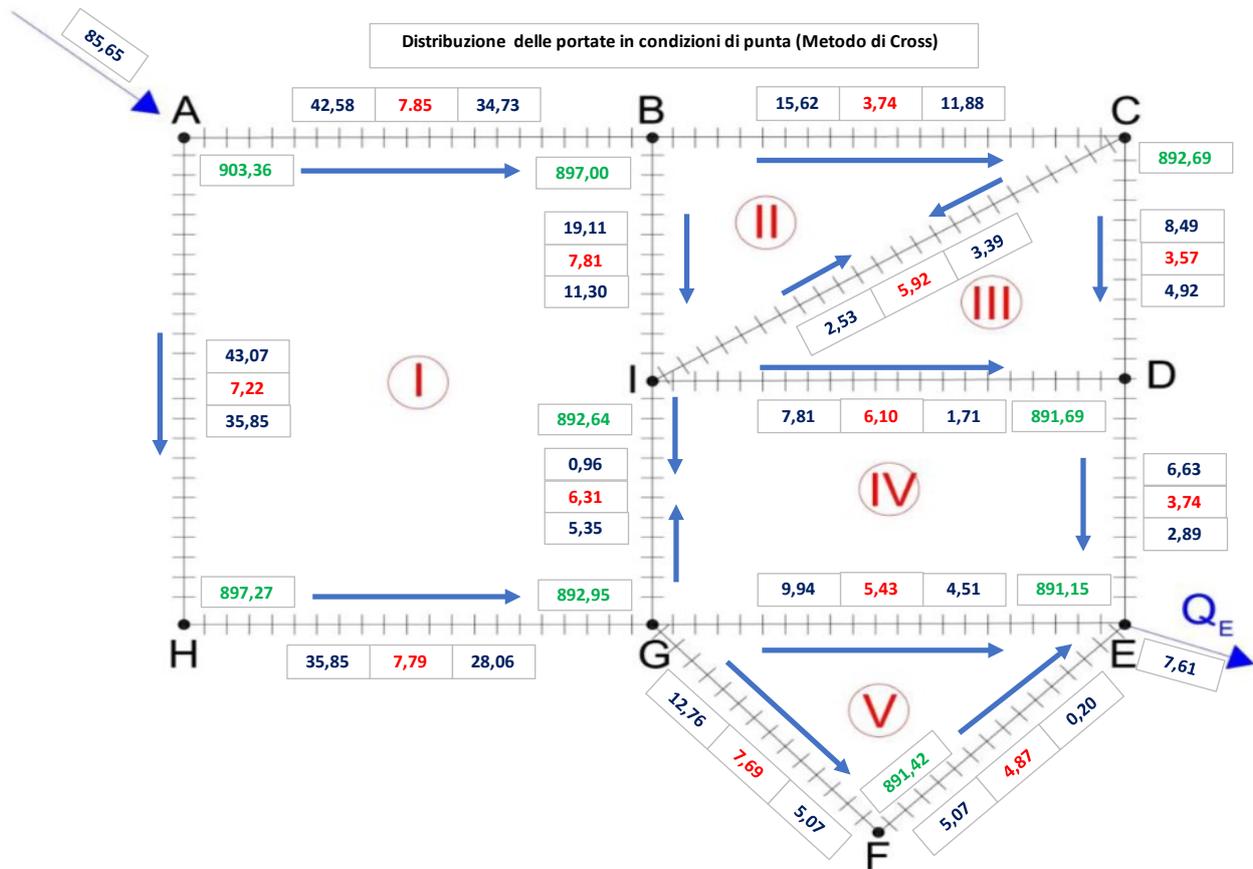


Figura 3: Distribuzione effettiva delle portate in condizioni di punta. Si noti la presenza di due punti di inversione del flusso nei tratti CI e GI.

Per completezza, è stata attuata una verifica della continuità nei nodi in maniera tale da poter valutare l'approssimazione commessa nel calcolo. Se ne riportano di seguito i risultati:

Verifica della continuità nei nodi			
Nodo	IN	OUT	Delta
A	85.65	85.65	0
B	34.73	34.73	0
C	11.88	11.88	0
D	6.63	6.63	0
E	7.60	7.61	-0.01
F	5.07	5.07	0
G	28.06	28.05	0.01
H	35.85	35.85	0
I	11.30	11.30	0

Tabella 4-3: Verifica della continuità nei nodi e dell'errore di approssimazione commesso.

L'errore di approssimazione raggiunge picchi dello 0.1% ed è complessivamente equilibrato nella rete, si ritiene dunque accettabile il risultato ottenuto.



4.1.3 Verifica alla punta

Si presentano di seguito i dati relativi alla verifica alla punta nei nodi e nei punti di inversione del flusso.

Verifica alla punta					
Nodo (-)	H (m)	Hmin (m)	Verificato? (s/n)	Margine (m)	Tasso di lavoro (%)
A	903.36	877.50	Sì	25.86	97.14
B	897.00	875.50	Sì	21.50	97.6
C	892.69	876.00	Sì	16.69	98.13
D	891.69	867.00	Sì	24.69	97.23
E	891.15	879.50	Sì	11.65	98.69
F	891.42	875.50	Sì	15.92	98.21
G	892.95	881.00	Sì	11.95	98.66
H	897.27	870.50	Sì	26.77	97.02
I	892.64	869.00	Sì	23.64	97.35

Tabella 4-5: Esito della verifica alla punta nei nodi.

Verifica nei punti di inversione del flusso															
Tratto	Punto	Nodo	Ltot (m)	Q (L/s)	qd (L/s)	Li (m)	D (mm)	ΔH_i (m)	ΔH_{tot} (m)	zp (m)	Hp (m)	Hmin,p (m)	Verificato? (s/n)	Margine (m)	Tasso di lavoro (%)
1		I	277.00	0.71	5.92	33.22	125	0.000	0.25	845.84	892.64	869.84	Sì	22.80	97.45
		C		5.21		243.78		0.251							
2		I	295.00	0.96	6.31	44.88	125	0.000	0.26	855.17	892.38	879.17	Sì	13.21	98.52
		G		5.35		250.12		0.262							

Tabella 4-4: Esito della verifica alla punta nei punti di inversione del flusso.

Poiché la rete è stata dimensionata in condizioni di punta, è del tutto lecito aspettarsi tassi di lavoro prossimi al 100%, con maggior margine di sicurezza in prossimità dei nodi adiacenti a classi diametrali ritoccate rispetto al dimensionamento.

Si riporta di seguito l'andamento della linea piezometrica nei nodi appartenenti all'anello esterno nella configurazione suddetta.

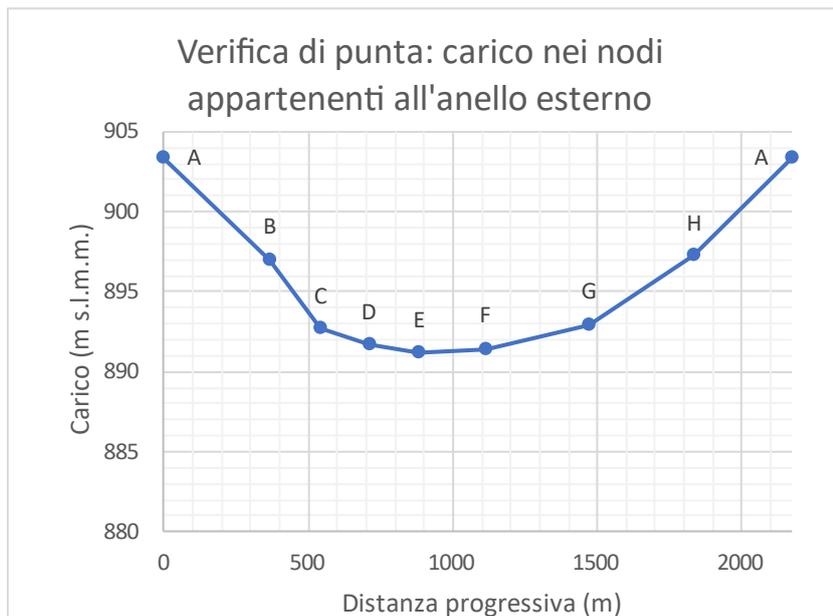


Figura 4: Linea piezometrica dell'anello esterno in condizioni di punta.

4.2 Verifica antincendio

Nella verifica antincendio ci si occupa di verificare che durante lo spegnimento di un incendio nel nodo idraulicamente più sfavorito la rete riesca ad erogare almeno l'80% della portata media giornaliera; ne segue che la portata complessiva in rete è pari $Q_{rete, incendio} = Q_{inc} + 0.80 \cdot Q_m$ a:, con Q_{inc} coincidente con la portata da fornire agli idranti, definita al paragrafo 1.2.

La verifica si esegue diversamente a seconda che il centro abitato di interesse sia dotato o meno di un presidio dei Vigili del Fuoco:

- Centro abitato con presidio: i V.V.F. raggiungono il luogo con un'autobotte che richiede almeno 5 m di carico sugli idranti per il caricamento e per evitare ritorni in rete. Si ha che $H_i \geq z_i + 5$ m.
- Centro abitato privo di presidio²¹: lo spegnimento dell'incendio avviene tramite manichette antincendio presenti negli edifici. Si ha che $H_i \geq H_{i,min} = z_i + H_{edif.} + \Delta H_{c.m.} + H_{res.}$

²¹ Detto criterio viene anche impiegato per i luoghi il cui tempo di raggiungimento da parte dei V.V.F. è superiore ai 40-50 minuti.



4.2.1 Definizione dello schema idraulico di riferimento per la verifica

Applicando il metodo delle sconnessioni, è stata determinata la seguente distribuzione congruente di portate:

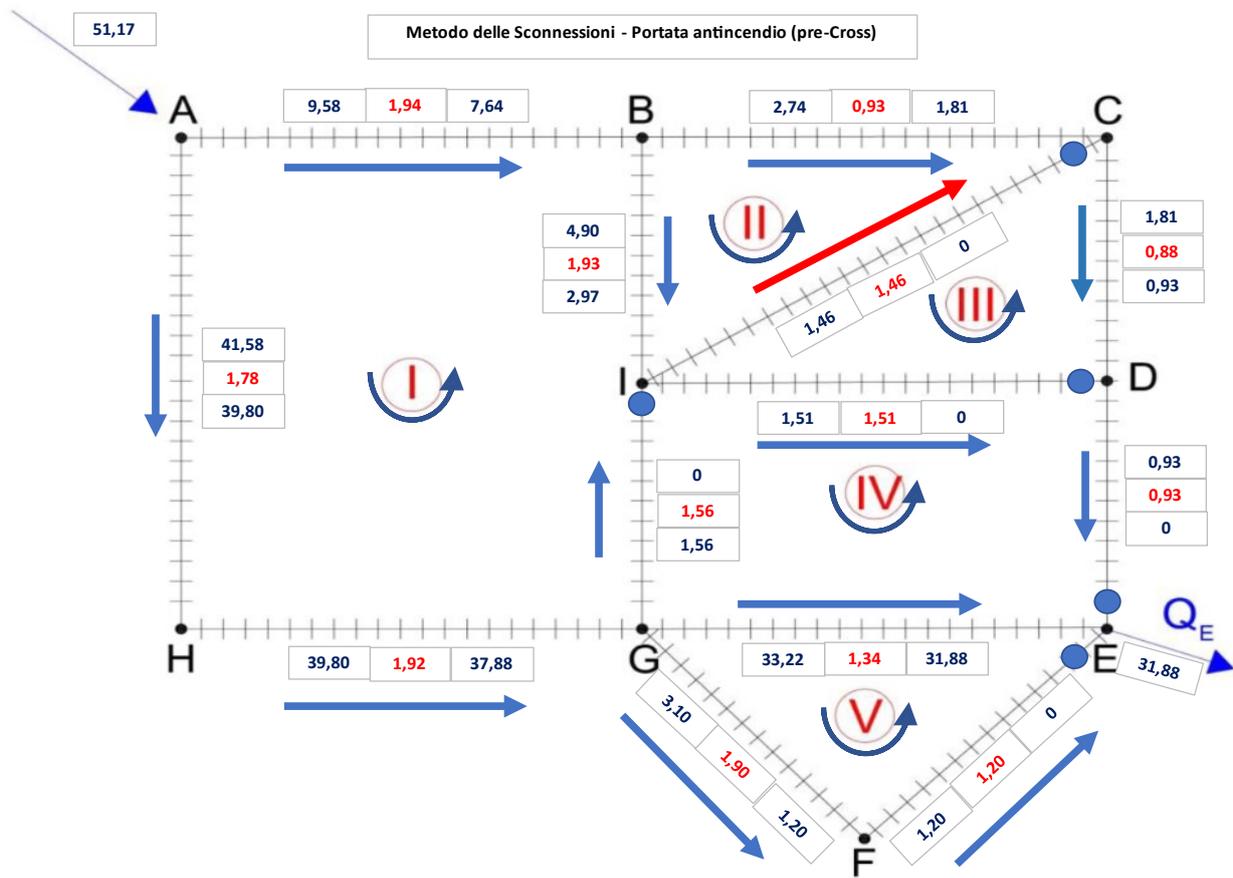


Figura 5: Distribuzione congruente di portate per la verifica antincendio. Si osservi in particolare il verso di percorrenza assunto nel tratto CI, opposto rispetto a quello determinato al termine dell'operazione di dimensionamento (in base alle differenti quote piezometriche nei nodi) ma congruente con la distribuzione individuata.

4.2.2 Applicazione del Metodo di Hardy-Cross e distribuzione effettiva delle portate

Avendo numerato ed orientato le maglie è possibile procedere nel metodo ed impiegare l'applicativo Excel fornito. Si riportano di seguito i dati immessi nel programma e i risultati ad essi associati.

Dati per excel Cross							Dati ottenuti		
ID Lato (-)	L (m)	D (m)	qd (L/s)	Qiniziale (L/s)	M+ (-)	M- (-)	R (-)	Qiniz,eff (L/s)	$\Delta H,eff$ (m)
AB	367.00	0.200	1.94	-7.64	1	0	4243.4375	-22.74	-2.39
BI	365.00	0.150	1.93	-2.97	1	2	18457.28395	-10.25	-2.33
GI	295.00	0.125	1.56	1.56	1	4	38202.24512	-1.56	-0.22
GH	364.00	0.200	1.92	39.8	1	0	4208.75	24.70	2.37
AH	337.50	0.200	1.78	41.58	1	0	3902.34375	26.48	2.56
BC	175.00	0.125	0.93	-1.81	2	0	22662.3488	-9.63	-2.31
CI	277.00	0.125	1.46	1.46	2	3	35871.26067	0.28	-0.01
CD	167.00	0.125	0.88	-0.93	3	0	21626.35571	-7.57	-1.39
DI	285.00	0.125	1.51	1.51	3	4	36907.25376	6.85	1.38
DE	175.00	0.125	0.93	0	4	0	22662.3488	-11.98	-3.51
EG	254.00	0.125	1.34	33.22	4	5	32892.78054	12.58	4.67
FG	359.50	0.150	1.90	3.1	5	0	18179.16049	11.77	2.13
EF	227.50	0.125	1.20	1.2	5	0	29461.05344	9.87	2.53

Tabella 4-6: Dati di input e output per la verifica in condizioni di incendio nel nodo E dell'applicativo Excel.

Si ottengono dunque i seguenti valori di carico nei nodi, espressi in metri. Avendo tutti i dati effettivi della rete a disposizione, è possibile definire l'effettiva distribuzione delle portate nella rete, riportata di seguito. In particolare, le portate distribuite (in rosso) e in ingresso/uscita rispetto ai nodi (in blu) sono espresse in L/s, mentre le quote piezometriche nei nodi (in verde) sono espresse in metri.

Nodo	Hdimens (m s.l.m.m.)	Heff (m s.l.m.m.)
A	903.36	904.36
B	889.03	901.97
C	884.63	899.66
D	881.06	898.27
E	878.36	894.76
F	879.78	897.32
G	883.10	899.85
H	893.30	901.99
I	883.59	899.65

Tabella 4-7: Carico nei nodi dal dimensionamento ed effettivo in condizioni di incendio nel nodo E.

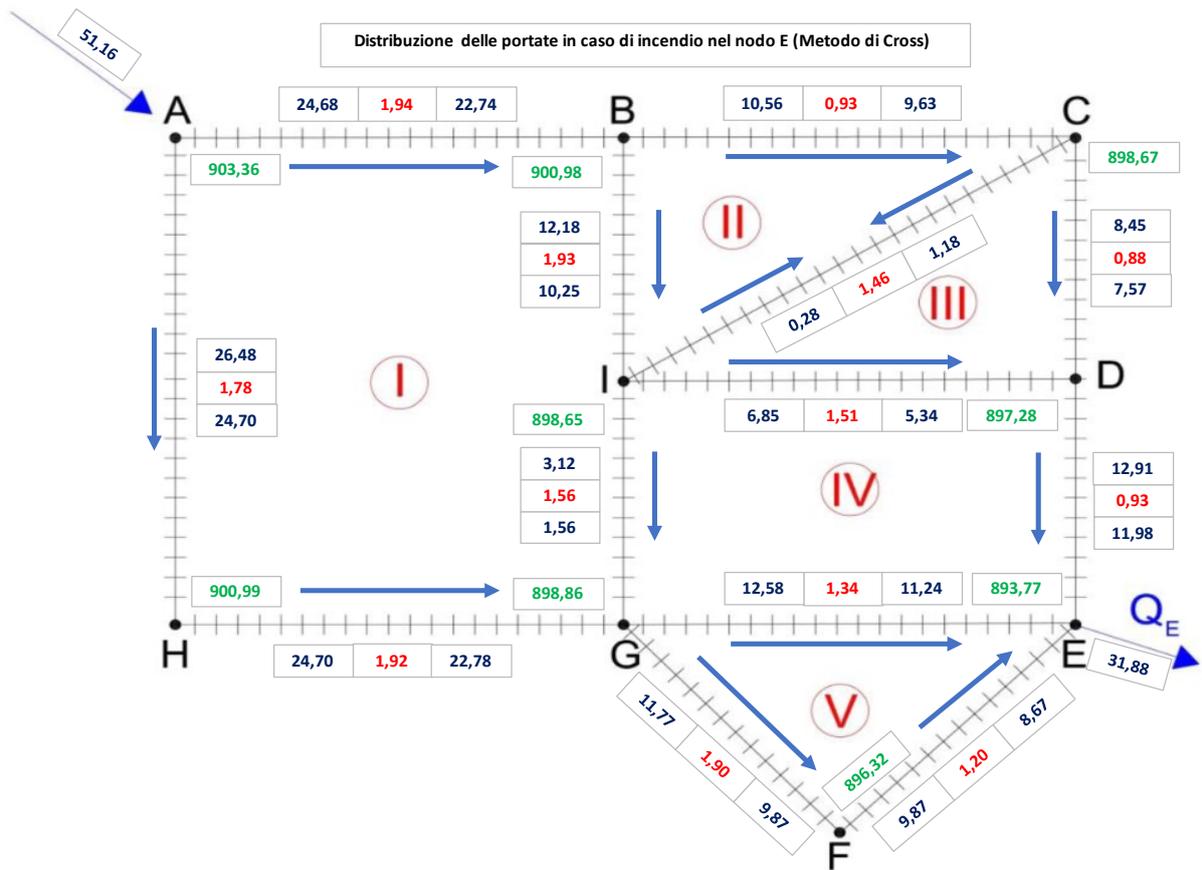


Figura 6: Distribuzione effettiva delle portate in condizioni di punta.

Per completezza, è stata attuata una verifica della continuità nei nodi in maniera tale da poter valutare l'approssimazione commessa nel calcolo. Se ne riportano di seguito i risultati:

Verifica della continuità nei nodi			
Nodo	IN	OUT	Delta
A	51.16	51.16	0
B	22.74	22.74	0
C	9.63	9.63	0
D	12.91	12.91	0
E	31.89	31.88	0.01
F	9.87	9.87	0
G	24.34	24.35	-0.01
H	24.7	24.7	0
I	10.25	10.25	0

Tabella 4-8: Verifica della continuità nei nodi e dell'errore di approssimazione commesso.

L'errore di approssimazione raggiunge picchi dello 0.04% ed è complessivamente equilibrato nella rete, si ritiene dunque accettabile il risultato ottenuto.

4.2.3 Verifica antincendio

Si presentano di seguito i dati relativi alla verifica in caso di incendio nel nodo E nei nodi della rete e nel punto di inversione del flusso nelle condizioni di assenza e presenza di presidio dei Vigili del Fuoco.

Verifica antincendio (incendio nel nodo E) in assenza di presidio VVF					
Nodo (-)	H (m)	Hmin (m)	Verificato? (s/n)	Margine (m)	Tasso di lavoro (%)
A	903.36	877.50	Sì	25.86	97.14
B	900.98	875.50	Sì	25.48	97.17
C	898.67	876.00	Sì	22.67	97.48
D	897.28	867.00	Sì	30.28	96.63
E	893.77	879.50	Sì	14.27	98.4
F	896.32	875.50	Sì	20.82	97.68
G	898.86	881.00	Sì	17.86	98.01
H	900.99	870.50	Sì	30.49	96.62
I	898.65	869.00	Sì	29.65	96.7

Tabella 4-12: Esito della verifica antincendio nei nodi in assenza di presidio VVF.

Verifica antincendio (incendio nel nodo E) con presidio VVF					
Nodo (-)	H (m)	Hmin (m)	Verificato? (s/n)	Margine (m)	Tasso di lavoro (%)
A	903.36	858.50	Sì	44.86	95.03
B	900.98	856.50	Sì	44.48	95.06
C	898.67	857.00	Sì	41.67	95.36
D	897.28	848.00	Sì	49.28	94.51
E	893.77	860.50	Sì	33.27	96.28
F	896.32	856.50	Sì	39.82	95.56
G	898.86	862.00	Sì	36.86	95.9
H	900.99	851.50	Sì	49.49	94.51
I	898.65	850.00	Sì	48.65	94.59

Tabella 4-11: Esito della verifica antincendio nei nodi in presenza di presidio VVF.

Verifica nei punti di inversione del flusso - Assenza di presidio VVF														
Tratto	Ltot	Q	qd	Li	D	ΔH_i	ΔH_{tot}	z _p	H _p	H _{min,p}	Verificato?	Margine	Tasso di lavoro	
Punto	Nodo	(m)	(L/s)	(L/s)	(m)	(mm)	(m)	(m)	(m)	(m)	(s/n)	(m)	(%)	
1	I	277.00	0.28	1.46	53.12	125	0.000	0.0108	852.00	898.65	876.00	Sì	22.65	97.48
	C		1.18		223.88		0.011							

Tabella 4-9: Esito della verifica antincendio nel punto di inversione del flusso in presenza di presidio VVF.

Verifica nei punti di inversione del flusso - Con presidio VVF														
Tratto	Ltot	Q	qd	Li	D	ΔH_i	ΔH_{tot}	z _p	H _p	H _{min,p}	Verificato?	Margine	Tasso di lavoro	
Punto	Nodo	(m)	(L/s)	(L/s)	(m)	(mm)	(m)	(m)	(m)	(m)	(s/n)	(m)	(%)	
1	I	277.00	0.28	1.46	53.12	125	0.000	0.0108	852.00	898.65	857.00	Sì	41.65	95.36
	C		1.18		223.88		0.011							

Tabella 4-10: Esito della verifica antincendio nel punto di inversione del flusso in presenza di presidio VVF.



Si osserva come, essendo i carichi richiesti in presenza del presidio dei Vigili del Fuoco minori, la verifica risulta soddisfatta con un maggior margine di sicurezza nel secondo caso. Si evidenzia in particolare come la rete operi comunque in prossimità del 100% delle proprie capacità, suggerendo un dimensionamento *sub-ottimale* dell'infrastruttura stessa. In particolare, si osserva che, essendo il punto di inversione del flusso prossimo al nodo I, il tasso di lavoro ed il margine rispetto alla condizione limite di esercizio in detto punto sono prossimi a quelli nel nodo suddetto.

Si riporta di seguito l'andamento della linea piezometrica nei nodi appartenenti all'anello esterno nella configurazione suddetta.

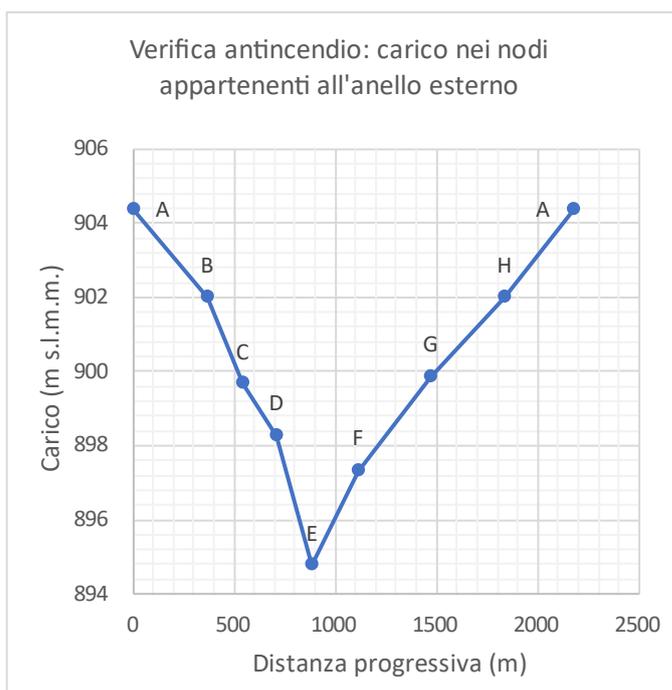


Figura 7: Linea piezometrica dell'anello esterno in caso di incendio nel nodo E.

4.3 Verifica a rottura

Nella verifica a rottura si suppone la rottura di uno dei due tratti che si dipanano dal nodo di immissione, in particolare quello a minor resistenza idraulica (in questo caso coincidente col tratto AH, come evidente dalle applicazioni precedenti del metodo di Cross²²) e in una sezione prossima al nodo di immissione stesso, condizione più gravosa.

La rete risulta così composta da $m-1$ maglie: la portata da erogare nel tratto soggetto a rottura viene modellata come portata concentrata uscente dal nodo non adiacente alla sezione interrotta; i tratti che svolgono unicamente servizio di estremità possono essere risolti con una regolare applicazione delle formule di resistenza. In questo modo si determina, a parità di numero di rotture e di portata richiesta dalle utenze, la massima portata transitante in rete, le massime perdite di carico e dunque le minime pressioni.

La verifica richiede che siano rispettate le ordinarie condizioni di esercizio della rete.

4.3.1 Definizione dello schema idraulico di riferimento per la verifica

Applicando il metodo delle sconnessioni, è stata determinata la seguente distribuzione congruente di portate:

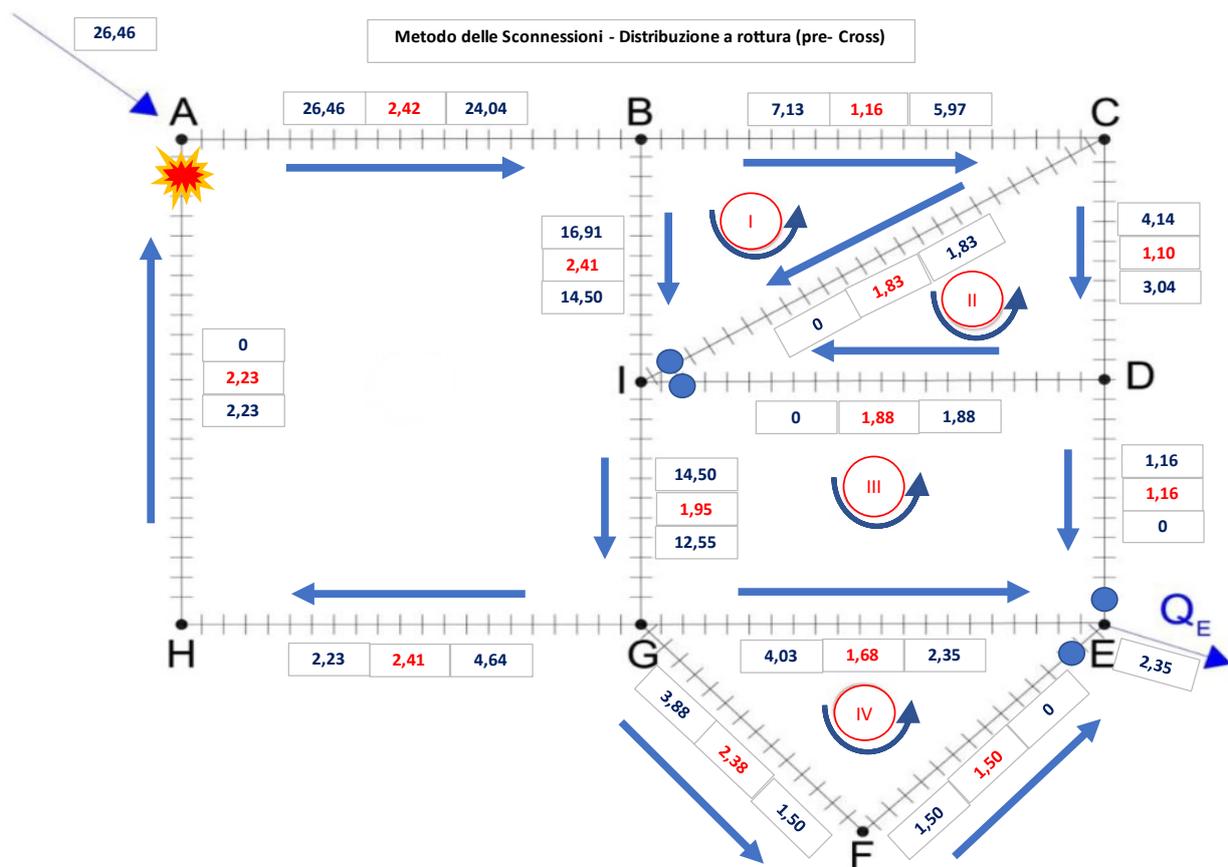


Figura 8: Distribuzione congruente di portate per la verifica a rottura.

²² v. Tab. 4-2, 4-6.



4.3.2 Applicazione del Metodo di Hardy-Cross e distribuzione effettiva delle portate

Avendo numerato ed orientato le maglie è possibile procedere nel metodo ed impiegare l'applicativo Excel fornito. Si riportano di seguito i dati immessi nel programma e i risultati ad essi associati.

Dati per excel Cross							Dati ottenuti		
ID Lato (-)	L (m)	D (m)	qd (L/s)	Qiniziale (L/s)	M+ (-)	M- (-)	R (-)	Qiniz,eff (L/s)	$\Delta H,eff$ (m)
BC	175.00	0.125	1.16	-5.97	1	0	22662.35	-9.73	-2.41
CI	277.00	0.125	1.83	0	1	2	35871.26	-1.57	-0.23
BI	365.00	0.150	2.41	16.91	1	0	18457.28	13.15	2.64
CD	167.00	0.125	1.10	-3.04	2	0	21626.36	-5.23	-0.72
DI	285.00	0.125	1.88	0	2	3	36907.25	4.55	0.49
DE	175.00	0.125	1.16	0	3	0	22662.35	-6.74	-1.22
EG	254.00	0.125	1.68	4.03	3	4	32892.78	-0.45	-0.06
GI	295.00	0.125	1.95	14.5	3	0	38202.25	7.76	1.77
FG	359.50	0.150	2.38	3.88	4	0	18179.16	1.62	0.01
EF	227.50	0.125	1.50	1.5	4	0	29461.05	-0.76	-0.07

Tabella 4-13: Dati di input e output per la verifica in condizioni di rottura nel tratto AH dell'applicativo Excel.

Si ottengono dunque i seguenti valori di carico nei nodi, espressi in metri. Avendo tutti i dati effettivi della rete a disposizione, è possibile definire l'effettiva distribuzione delle portate nella rete, riportata di seguito. In particolare, le portate distribuite (in rosso) e in ingresso/uscita rispetto ai nodi (in blu) sono espresse in L/s, mentre le quote piezometriche nei nodi (in verde) sono espresse in metri.

Nodo	Hdimens (m s.l.m.m.)	Heff (m s.l.m.m.)
A-	903.36	904.81
B	889.03	902.06
C	884.63	899.65
D	881.06	898.93
E	878.36	897.71
F	879.78	897.64
G	883.10	897.63
H	893.30	897.57
I	883.59	899.42
A+	-	897.57

Tabella 4-14: Carico nei nodi dal dimensionamento ed effettivo in condizioni di rottura nel tratto AH. Si osservi la distinzione tra nodo A- (precedente alla rottura, collegato al tratto AB) e A+ (successivo alla rottura, punto terminale del tratto AH).

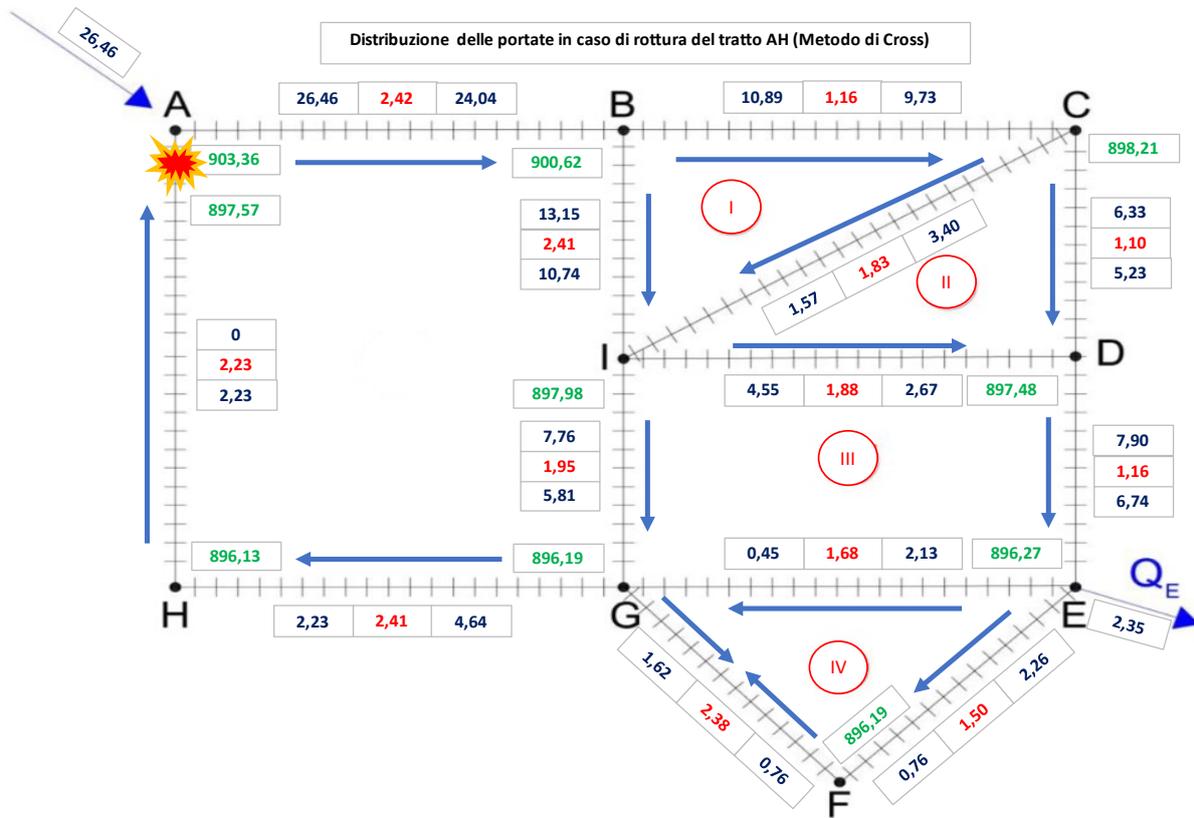


Figura 9: Distribuzione effettiva delle portate in caso di rottura del tratto AH. Si osservi in particolare l'individuazione di due punti di inversione del flusso, nei tratti CI e FG.

Per completezza, è stata attuata una verifica della continuità nei nodi in maniera tale da poter valutare l'approssimazione commessa nel calcolo. Se ne riportano di seguito i risultati:

Verifica della continuità nei nodi			
Nodo	IN	OUT	Delta
A	26.46	26.46	0
B	24.04	24.04	0
C	9.73	9.73	0
D	7.90	7.90	0
E	6.74	6.74	0
F	0.76	0.76	0
G	6.26	6.26	0
H	2.23	2.23	0
I	12.31	12.31	0

Tabella 4-15: Verifica della continuità nei nodi e dell'errore di approssimazione commesso.

Non si riscontrano errori di approssimazione apprezzabili.



4.3.3 Verifica a rottura

Si presentano di seguito i dati relativi alla verifica in caso di rottura del tratto AH nei nodi e nel punto di inversione del flusso individuato.

Verifica a rottura (tratto AH)					
Nodo (-)	H (m)	Hmin (m)	Verificato? (s/n)	Margine (m)	Tasso di lavoro (%)
A-	903.36	877.50	Sì	25.86	97.14
B	900.62	877.50	Sì	23.12	97.43
C	898.21	877.50	Sì	20.71	97.69
D	897.48	877.50	Sì	19.98	97.77
E	896.27	877.50	Sì	18.77	97.91
F	896.19	877.50	Sì	18.69	97.91
G	896.19	877.50	Sì	18.69	97.92
H	896.13	877.50	Sì	18.63	97.92
I	897.98	877.50	Sì	20.48	97.72
A+	896.12	877.50	Sì	18.62	97.92

Tabella 4-16: Esito della verifica a rottura nei nodi.

Verifica nei punti di inversione del flusso														
Tratto	Ltot	Q	qd	Li	D	ΔH_i	ΔH_{tot}	zp	Hp	Hmin,p	Verificato?	Margine	Tasso di lavoro	
Punto	Nodo	(m)	(L/s)	(L/s)	(m)	(mm)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(s/n)	(m)	(%)
1	F	359.5	0.76	2.38	114.80	150	0.00036	0.00701	847.90	897.98	871.90	Sì	26.08	97.10
	G		1.62		244.70		0.00737							

Tabella 4-17: Esito della verifica a rottura nel punto di inversione del flusso.

Si osserva che la verifica presenta tassi di lavoro per la rete prossimi al 100%, confermando l'ipotesi sulla bontà del dimensionamento effettuato.

Si riporta di seguito l'andamento della linea piezometrica nei nodi appartenenti all'anello esterno nella configurazione suddetta.

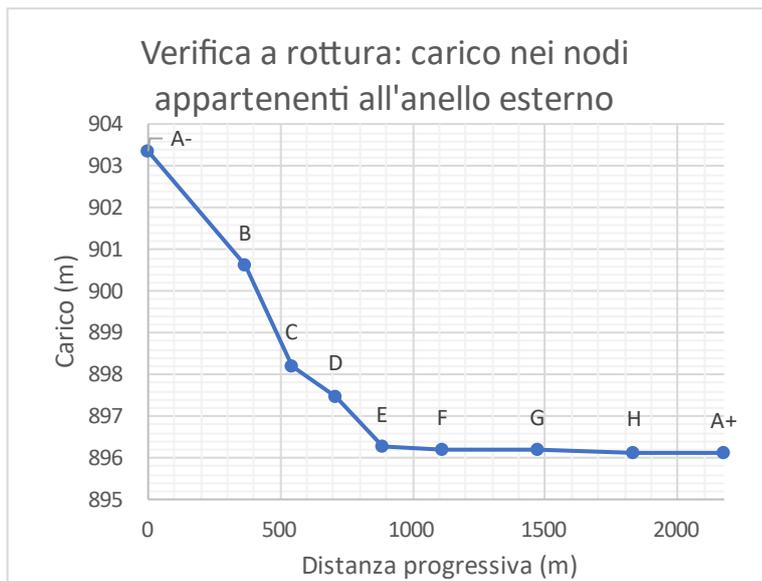


Figura 10: Linea piezometrica dell'anello esterno in caso di rottura del tratto AH.

5. Verifica in EPANET

EPANET 2.0 è un software open source reso disponibile dalla *United States Environmental Protection Agency* che consente di effettuare simulazioni di lungo periodo sul comportamento idraulico e la qualità delle acque di una rete di distribuzione idrica.

Per verificare il dimensionamento effettuato, è stato realizzato uno schema della rete in ambiente EPANET, avendo cura di specificare:

- I dati geometrico-altimetrici dei nodi e dei tratti;
- I diametri delle tubazioni e della condotta di avvicinamento come da esito del criterio del Foltz e conseguente operazione di ritocco;
- I coefficienti di scabrezza di *Hazen-Williams*, assunti pari a 145 per la condotta di avvicinamento e 135 per le tubazioni della rete.

Poiché il software non è in grado di modellizzare uno schema di condotta con servizio di erogazione distribuita, occorre ripartire le portate distribuite nei nodi di estremità di ciascun tratto; lo schema conseguente presenta differenti erogazioni concentrate per ciascun nodo. Si riportano di seguito i dati alla base del procedimento di verifica, con una doppia schematizzazione delle erogazioni antincendio dipendente dall'approccio selezionabile nel procedimento di verifica dal programma²³.

²³ In particolare, il primo schema è relativo ad un pattern di consumi con coefficiente identicamente pari ad 1; il secondo è legato invece ad un pattern di consumi identicamente pari a 08.0 e prevede un aumento del 125% dell'aliquota Q_{inc} da erogare nel nodo E, in maniera tale da garantire che siano rispettati i 30 L/s di erogazione degli idranti.



Nodo	Quota terreno (m.s.l.m.m.)	Erogazione media (L/s)	Erogazione di Punta (L/s)	Erog. Incendio 1 (L/s)	Erog. Incendio 2 (L/s)
A	853.50	2.55	7.53	2.04	2.55
B	851.50	3.29	9.70	1.57	3.29
C	852.00	2.24	6.62	1.80	2.24
D	843.00	2.27	6.71	1.82	2.27
E	855.50	4.73	14.63	33.79	42.23
F	851.50	2.13	6.28	1.70	2.13
G	857.00	4.61	13.61	3.69	4.61
H	846.50	2.54	7.50	2.03	2.54
I	845.00	4.43	13.07	3.54	4.43

Tabella 5-1: Erogazioni concentrate nei nodi per modellazione in EPANET. La colonna in verde rappresenta le erogazioni puntuali selezionate per la modellazione del comportamento della rete in caso di incendio.

È dunque possibile rappresentare l'evoluzione della rete al variare dei consumi delle utenze attraverso l'introduzione di un *pattern dei consumi*, andamento temporale del coefficiente moltiplicativo della portata media che schematizza la variazione di richiesta nel tempo. Si ipotizza dunque un coefficiente per ogni fascia oraria, avendo cura che alla portata di punta corrisponda il coefficiente omonimo e che la media di tutti i coefficienti sia unitaria. Inoltre, si considera come valore minimo 0.30, in quanto anche nella fascia oraria di minor consumo si registra una ridotta richiesta di portata (ad esempio dovute a perdite idriche nel sistema). Si riporta di seguito l'andamento del coefficiente moltiplicativo della portata media in forma tabellare e grafica.

Moltiplicatori portata media	
h	C(h)
0	0.33
1	0.33
2	0.35
3	0.30
4	0.36
5	0.66
6	0.99
7	1.19
8	3.24
9	1.65
10	1.52
11	1.25
12	1.12
13	1.32
14	1.65
15	1.59
16	1.12
17	0.66
18	0.53
19	0.73
20	0.79
21	0.92
22	0.79
23	0.59
24	0.33
Media	1

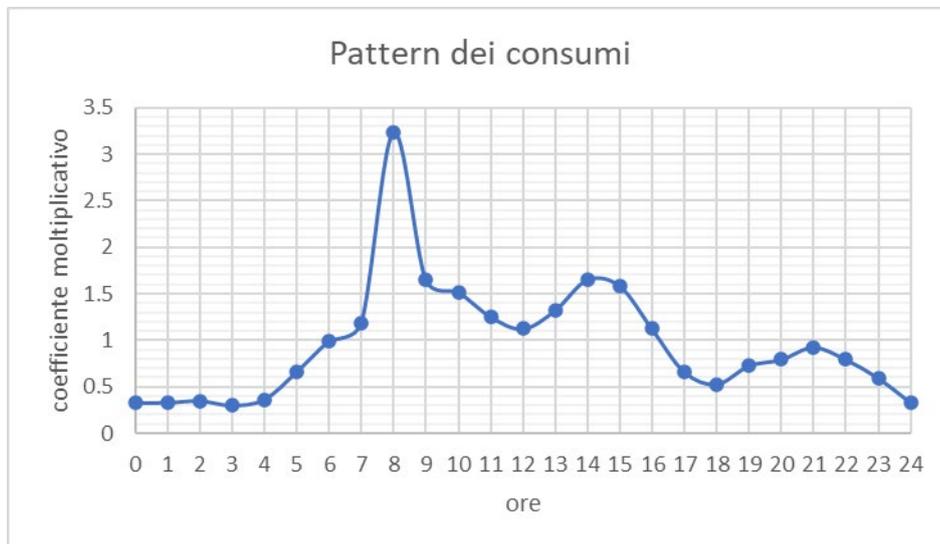


Figura 11: Pattern dei consumi per il centro urbano di riferimento.

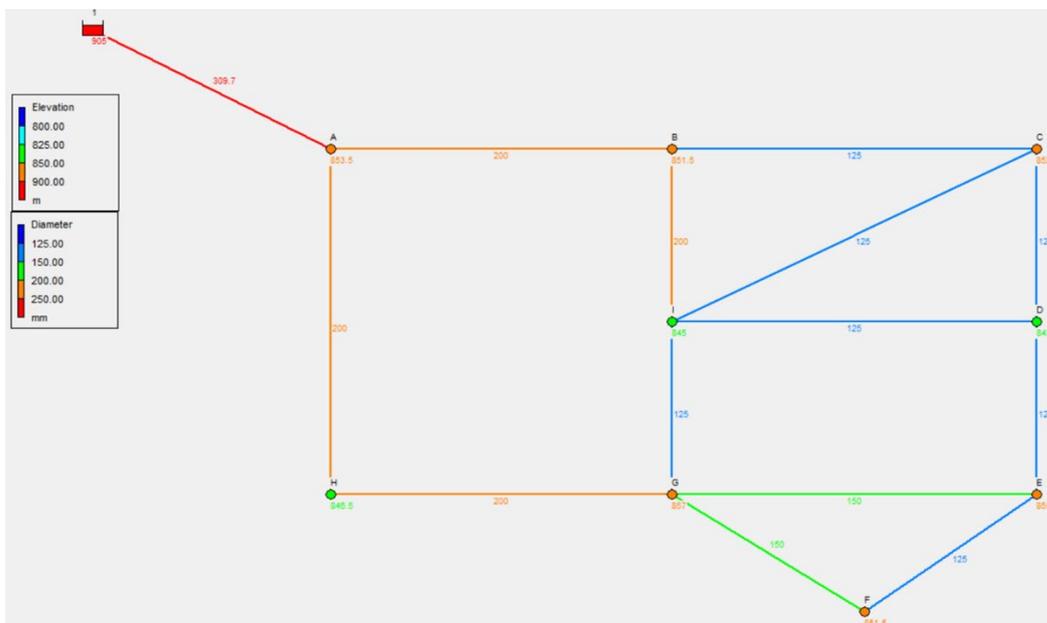
Tabella 5-2: Andamento orario del moltiplicatore della portata media

Associando il pattern dei consumi allo schema della rete è possibile valutare il soddisfacimento delle condizioni di esercizio e la differente distribuzione dei carichi nei nodi nel corso della giornata. Si riporta a titolo esemplificativo il funzionamento della rete alle ore 6.00, in cui il coefficiente moltiplicativo della portata assume valore pressoché unitario:

Network Table - Nodes at 6:00 Hrs					
Node ID	Elevation (m)	Base Demand (L/s)	Demand (L/s)	Head (m)	Pressure (m)
Junc A	853.50	2.33	2.89	904.82	51.32
Junc B	851.50	3.00	3.72	904.31	52.81
Junc C	852.00	2.04	2.53	904.13	52.13
Junc D	843.00	2.07	2.57	904.08	61.08
Junc E	855.50	4.52	5.60	904.05	48.55
Junc F	851.50	1.94	2.41	904.06	52.56
Junc G	857.00	4.20	5.21	904.15	47.15
Junc H	846.50	2.32	2.88	904.43	57.93
Junc I	845.00	4.04	5.01	904.15	59.15
Resvr 1	905.00	#N/A	-32.81	905.00	0.00

Tabella 5-3: Funzionamento della rete in condizioni prossime alla portata media.

Si propone di seguito lo schema utilizzato per la simulazione del comportamento della rete a 24 ore, in fascia oraria di punta e in caso di incendio nel nodo idraulicamente più sfavorito.



5.1 Verifica alla punta

Si riportano di seguito i dati ottenuti dalla risoluzione in EPANET della rete alle ore 8.00, in cui si registra – atteso il pattern di consumi introdotto in precedenza – un coefficiente moltiplicativo pari al coefficiente di punta.



Verifica di Punta					
Node ID	Elevation (m)	Base Demand (L/s)	Demand (L/s)	Head (m)	Pressure (m)
Junc A	853.50	2.33	3.84	904.69	51.19
Junc B	851.50	3.00	4.95	903.82	52.32
Junc C	852.00	2.04	3.37	903.53	51.53
Junc D	845.00	4.04	6.67	903.56	58.56
Junc E	843.00	2.07	3.42	903.43	60.43
Junc F	846.50	2.32	3.83	904.03	57.53
Junc G	857.00	4.20	6.93	903.55	46.55
Junc H	855.50	4.52	7.46	903.39	47.89
Junc I	851.50	1.94	3.20	903.40	51.90
Resvr 1	905.00	#N/A	-43.66	905.00	0.00

Tabella 5-4: Verifica alla punta in EPANET.

Da un confronto con la *Tabella 4-1*, è possibile osservare che i valori ottenuti in EPANET si discostano da quelli ottenuti nel calcolo di un valore compreso tra 1 e 14 m, fornendo carichi nei nodi maggiori rispetto a quelli valutati con il metodo di Hardy-Cross. In particolare, i nodi più impattati sono i nodi C, D, E, F, G, I, con valori che si discostano di più di 10m da quanto valutato al *Paragrafo 4.1*.

Si riporta di seguito il grafico della linea piezometrica dei carichi nell'anello esterno, il cui andamento è del tutto analogo rispetto a quello definito al *Paragrafo 4*.



Figura 12: Linea piezometrica in condizioni di punta dell'anello esterno – EPANET.

5.2 Verifica antincendio

La verifica ha oggetto del tutto analogo rispetto a quanto svolto nel *Paragrafo 4.2*; si riportano di seguito i dati ottenuti in EPANET imponendo un coefficiente moltiplicativo della portata identicamente uguale a 0.80 ed incrementando del 125% la portata antincendio erogata nel nodo E, in maniera tale da garantire l'erogazione di 30 L/s in aggiunta all'erogazione concentrata nel nodo, pari all'80% della portata media erogata dallo stesso.

Verifica Antincendio					
Node ID	Elevation (m)	Base Demand (L/s)	Demand (L/s)	Head (m)	Pressure (m)
Junc A	853.50	2.33	1.86	904.59	51.09
Junc B	851.50	3.00	2.40	903.41	51.91
Junc C	852.00	2.04	1.63	902.86	50.86
Junc D	843.00	2.07	1.66	902.34	59.34
Junc E	855.50	42.02	33.62	901.08	45.58
Junc F	851.50	1.94	1.55	901.80	50.30
Junc G	857.00	4.20	3.36	902.48	45.48
Junc H	846.50	2.32	1.86	903.50	57.00
Junc I	845.00	4.04	3.23	902.92	57.92
Resvr 1	905.00	#N/A	-51.17	905.00	0.00

Tabella 5-5: Verifica antincendio (Nodo E) in EPANET.

Anche in questo caso, i dati relativi al carico nei nodi sono maggiori rispetto a quelli valutati al Paragrafo 4.2, pur presentando un andamento grafico compatibile con quanto valutato in precedenza, con cuspidi nel nodo idraulicamente più sfavorito dettata dal sensibile incremento di portata in corrispondenza di classi diametrali relativamente minori, che implica significativi incrementi delle perdite di carico.

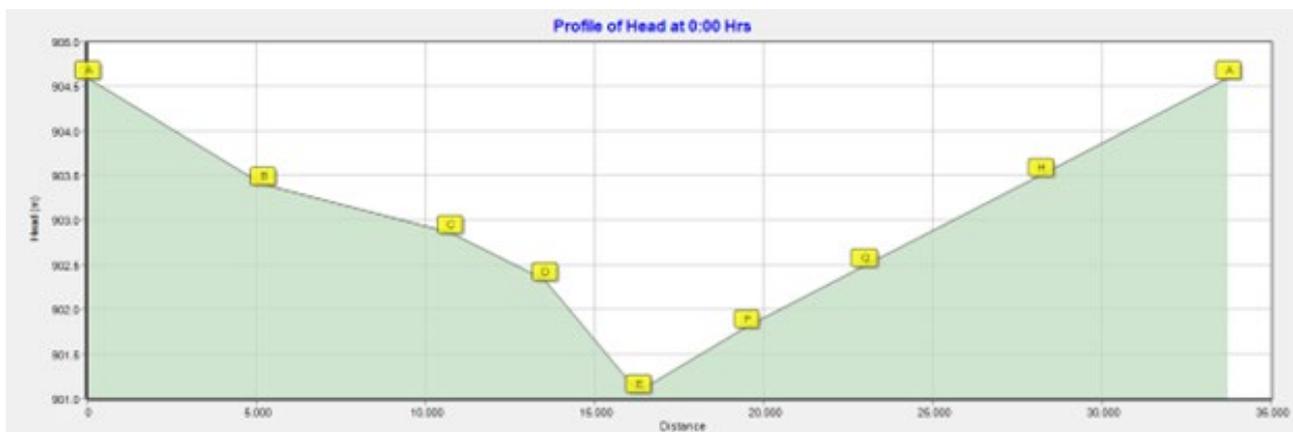


Figura 13: Linea piezometrica dell'anello esterno in caso di incendio nel nodo E – EPANET.

In virtù della rapida capacità di elaborazione del programma, si riportano di seguito i dati relativi all'esercizio della rete supponendo il soddisfacimento della verifica antincendio in caso di portate defluenti corrispondenti a quanto richiesto nella fascia oraria di punta.



Verifica Punta + Incendio					
Node ID	Elevation (m)	Base Demand (L/s)	Demand (L/s)	Head (m)	Pressure (m)
Junc A	853.50	2.33	4.03	903.29	49.79
Junc B	851.50	3.00	5.19	898.35	46.85
Junc C	852.00	2.04	3.53	896.08	44.08
Junc D	843.00	2.07	3.58	893.88	50.88
Junc E	855.50	42.02	72.69	888.64	33.14
Junc F	851.50	1.94	3.36	891.67	40.17
Junc G	857.00	4.20	7.27	894.50	37.50
Junc H	846.50	2.32	4.01	898.75	52.25
Junc I	845.00	4.04	6.99	896.33	51.33
Resvr 1	905.00	#N/A	-110.65	905.00	0.00

Tabella 5-6: Verifica antincendio (Nodo E) in condizioni di punta in EPANET.

Logicamente, il soddisfacimento di una simile verifica, incompatibile con i parametri di progetto, implicherebbe uno smisurato sovradimensionamento dell'impianto rispetto alle condizioni dettate nel *Paragrafo 3*.

5.3 Verifica a rottura

In virtù delle possibilità di rapida elaborazione del programma, sono state attuate due distinte verifiche a rottura:

- Rottura del tratto AH in prossimità del nodo A;
- Rottura del tratto AB in prossimità del nodo A.

Come intuibile, dalle verifiche emerge come la rottura del tratto AH utilizzata per la verifica al *Paragrafo 4* risulti essere la più gravosa, in virtù della minor resistenza idraulica del tratto.

Nelle verifiche è stato considerato uno schema geometrico della rete differente, necessario per determinare risultati più accurati. È stato reciso il tronco interessato dalla rottura, aggiungendo un nodo "A" al termine dello stesso ed un nodo A- a monte della rottura. Si riporta di seguito lo schema grafico impiegato per la verifica a rottura nel tratto AH.

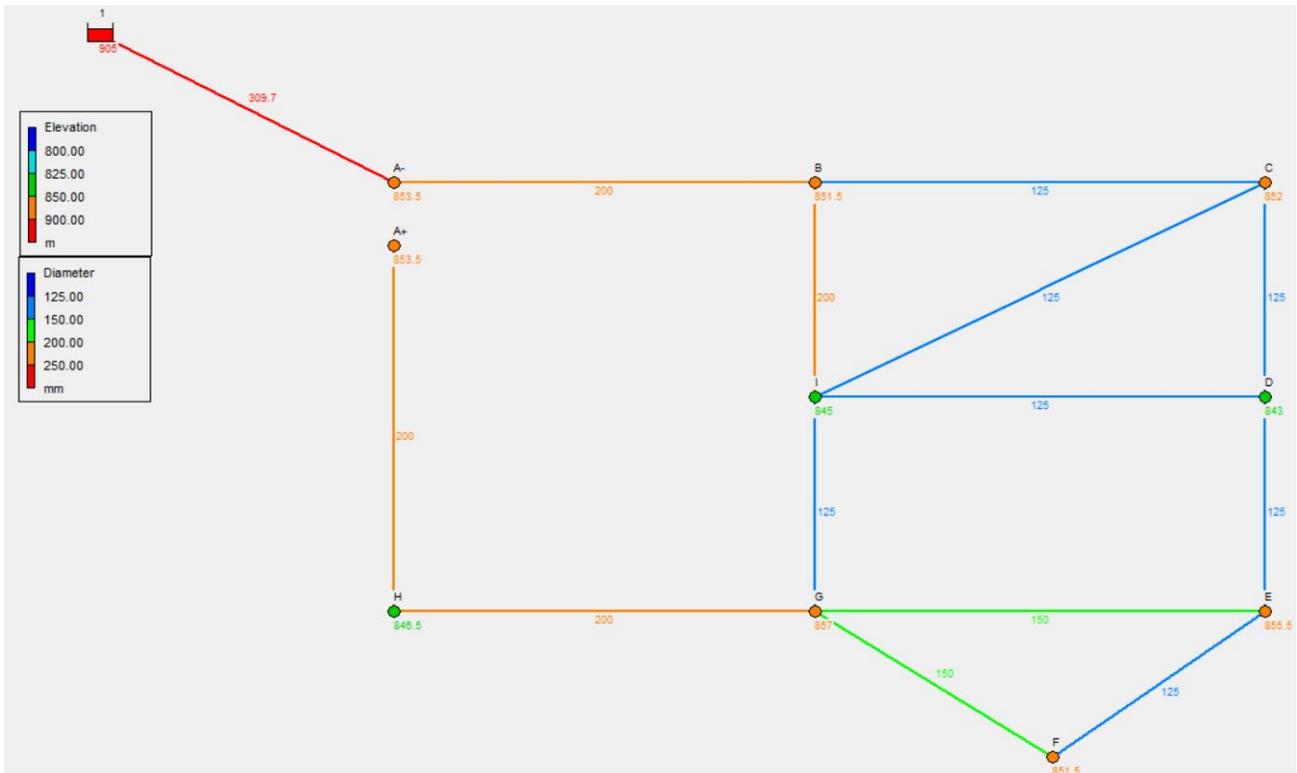


Figura 14: Schematizzazione della rete in caso di rottura nel tratto AH.

5.3.1 Verifica a rottura del tratto AH

Si riportano di seguito i dati ottenuti dalla risoluzione in EPANET della rete secondo lo schema grafico mostrato in Figura 14.

Verifica a rottura tronco AH					
Node ID	Elevation (m)	Base Demand (L/s)	Demand (L/s)	Head (m)	Pressure (m)
Junc A-	853.50	2.33	51.38	904.88	51.36
Junc B	851.50	3.00	52.24	903.74	49.99
Junc C	852.00	2.04	51.28	903.28	49.51
Junc D	843.00	2.07	60.01	903.01	58.60
Junc E	855.50	4.52	47.03	902.53	46.57
Junc F	851.50	1.94	51.01	902.51	50.72
Junc G	857.00	4.20	45.52	902.52	45.47
Junc H	846.50	2.32	56.00	902.50	57.11
Junc I	845.00	4.04	58.29	903.29	56.53
Junc A+	853.50	0.00	49.00	902.50	0.00
Resvr 1	905.00	#N/A	-28.88	905.00	0.00

Tabella 5-7: Verifica a rottura nel tronco AH in EPANET.



Nuovamente, pur essendo i dati relativi ai carichi nei nodi maggiori rispetto a quanto valutato al Paragrafo 4.3, si osserva che la distribuzione di carichi nell'anello esterno è congruente con quella valutata in precedenza.

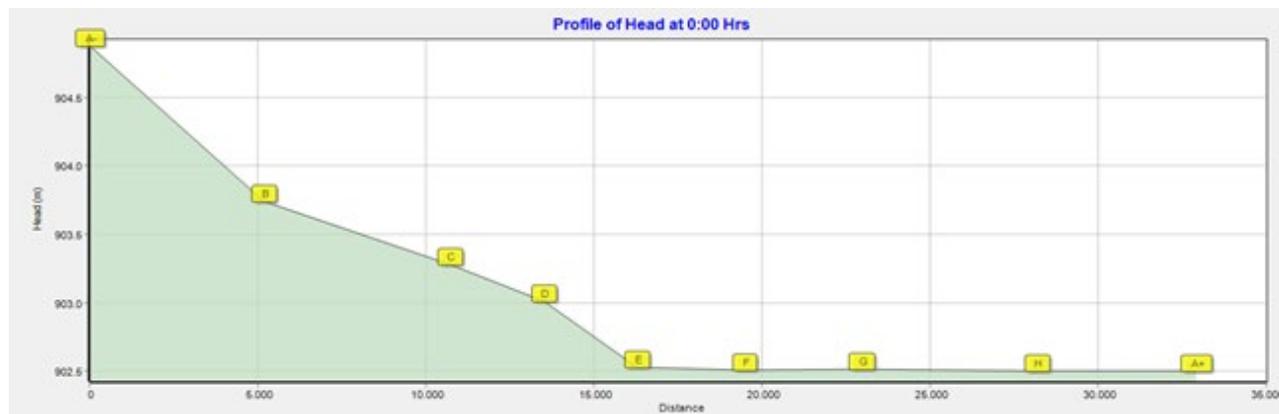


Figura 15: Linea piezometrica dell'anello esterno in caso di rottura nel tratto AH - EPANET.

5.3.2 Verifica a rottura del tratto AB

Si riportano di seguito i dati ottenuti dalla risoluzione in EPANET della rete in caso di rottura in una sezione adiacente al nodo di immissione ma appartenente al tratto AB.

Verifica a rottura tronco AB					
Node ID	Elevation (m)	Base Demand (L/s)	Demand (L/s)	Head (m)	Pressure (m)
Junc A-	853.50	2.33	2.33	904.86	51.36
Junc B	851.50	5.42	5.42	901.49	49.99
Junc C	852.00	2.04	2.04	901.51	49.51
Junc D	843.00	2.07	2.07	901.60	58.60
Junc E	855.50	4.52	4.52	902.07	46.57
Junc F	851.50	1.94	1.94	902.22	50.72
Junc G	857.00	4.20	4.20	902.47	45.47
Junc H	846.50	2.32	2.32	903.61	57.11
Junc I	845.00	4.04	4.04	901.53	56.53
Junc A+	853.50	0.00	0.00	901.36	0.00

Tabella 5-8: Verifica a rottura nel tronco AB in EPANET.

Si riporta per completezza l'andamento grafico di detta distribuzione dei carichi:

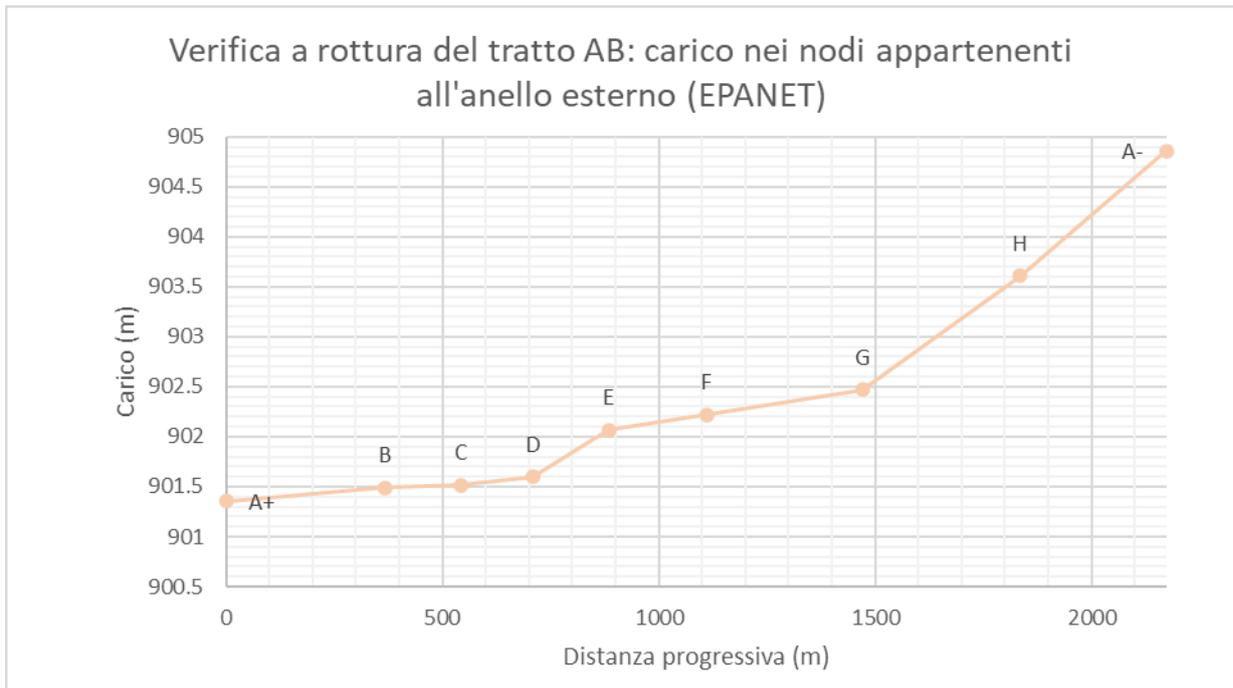
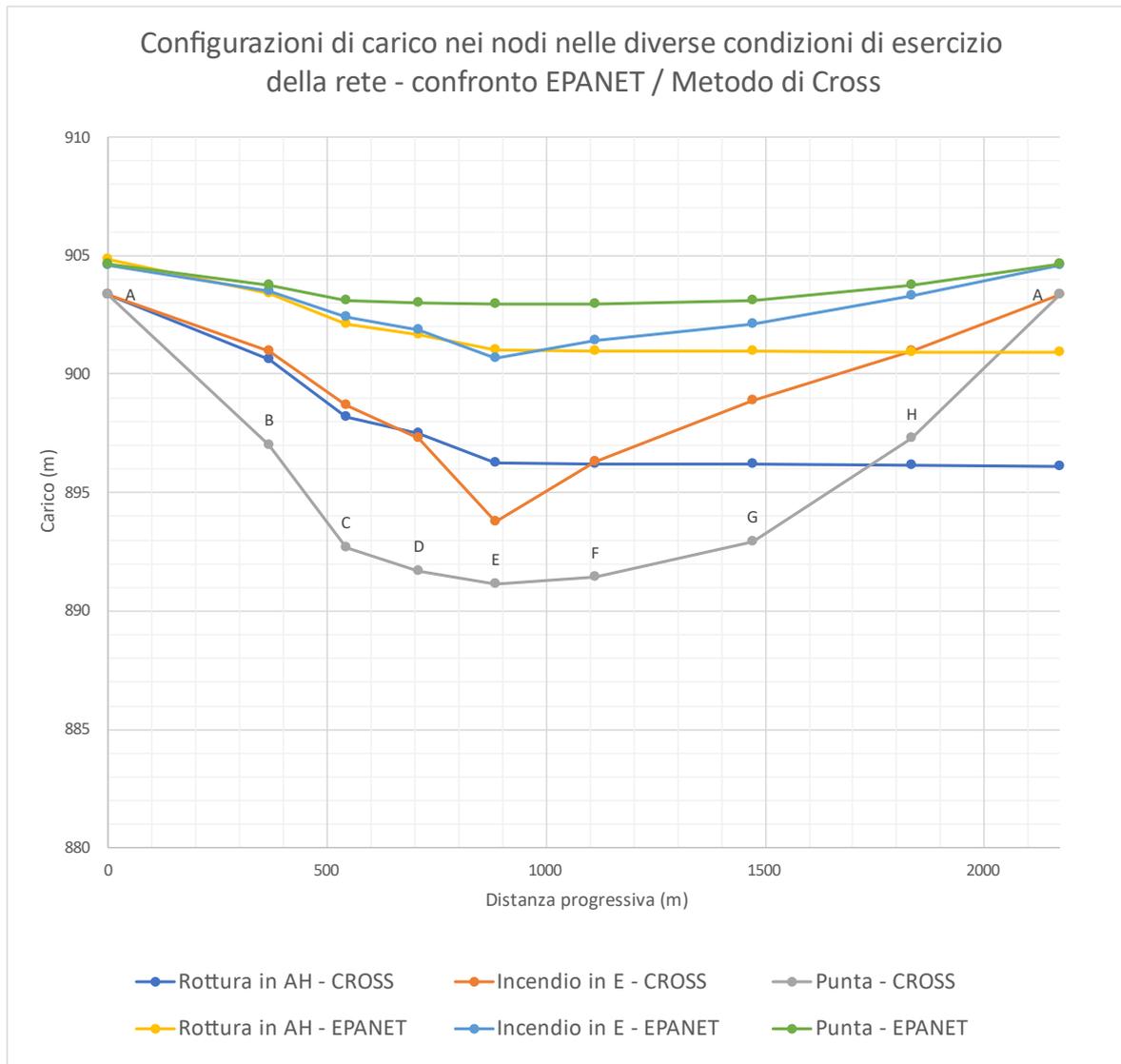


Figura 16: Linea piezometrica dell'anello esterno in caso di rottura nel tratto AB - EPANET.

5.4 Confronto con le verifiche realizzate col metodo di Cross

Si riporta di seguito un confronto grafico tra i valori ottenuti dalla verifica con il metodo di Hardy-Cross e quelli ricavati in EPANET per meglio definire le variazioni di carico tra le differenti condizioni di funzionamento e con i diversi metodi di analisi.



Si osserva come di fatto le verifiche operino secondo ordini di grandezza differenti, giungendo ad andamenti e conclusioni compatibili sul piano concettuale e qualitativo ma non su quello quantitativo. Difatti, come evidenziato di seguito, è possibile osservare come gli andamenti delle condizioni di esercizio della rete siano sovrapponibili se rapportati ad un'opportuna scala, rivelando come la formula di Hazen-Williams sia significativamente meno cautelativa rispetto al metodo di verifica di Hardy-Cross.

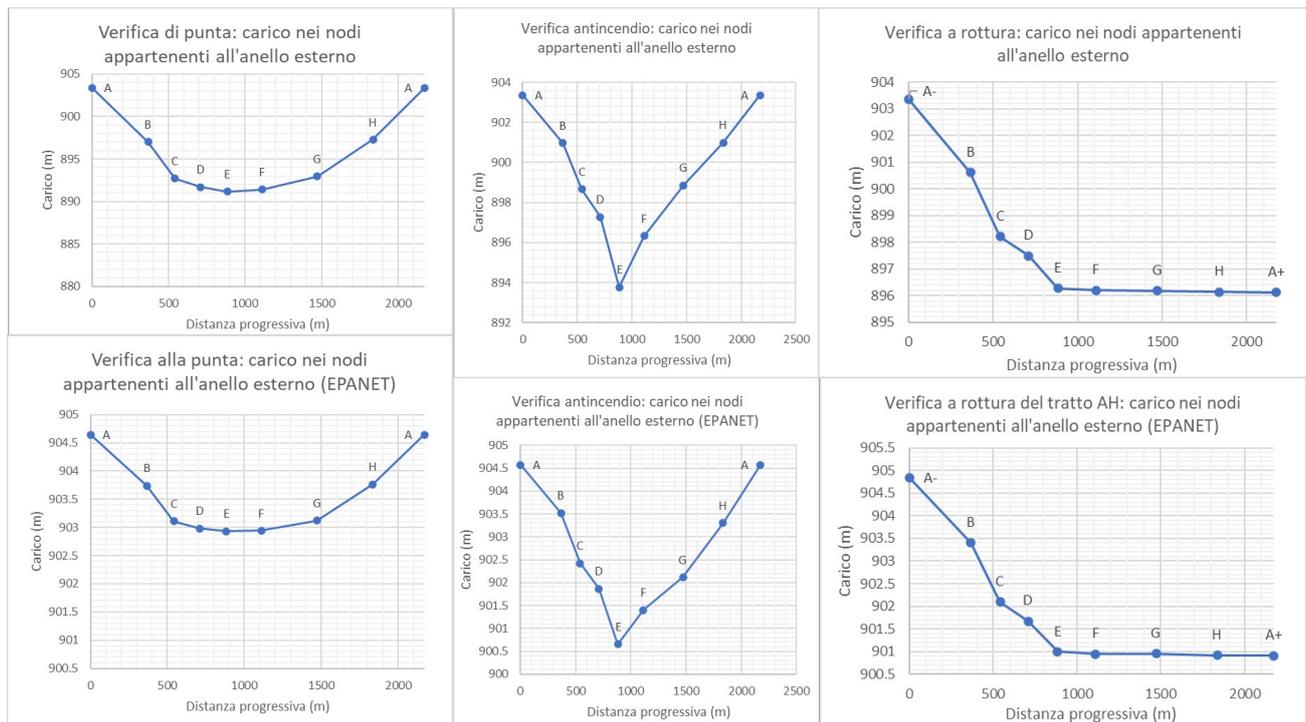


Figura 17: Confronto qualitativo dell'andamento dei carichi nelle diverse condizioni di esercizio e nei due differenti metodi di verifica.

6. Dimensionamento di un impianto idrico sanitario

Formalmente, l'impianto idrico sanitario di un edificio comprende sia l'impianto di approvvigionamento – ovvero di distribuzione dell'acqua calda e fredda sanitaria alle varie utenze – che di scarico, ovvero di allontanamento o smaltimento dell'acqua utilizzata; logicamente, la porzione di impianto attinente ad una rete di distribuzione idrica è la prima, del dimensionamento della quale ci si occuperà nel presente paragrafo.

Un generico impianto di approvvigionamento si compone di:

- Sistema di approvvigionamento (allacciamento alla rete pubblica dell'acquedotto);
- Sistema e rete di distribuzione dell'acqua fredda e calda;
- Sistema di produzione dell'acqua calda;
- Dispositivi di erogazione ed apparecchi sanitari.



Nella presente applicazione si è ipotizzato uno schema di distribuzione domestica *ad albero*, economico e di semplice realizzazione ma poco elastico, con una colonna montante unica da cui si dipanano le varie diramazioni. Si è considerato un generico edificio residenziale di 3 piani con 2 appartamenti a piano dotati di una cucina, un bagno padronale ed un bagno di servizio, secondo lo schema riportato di seguito.

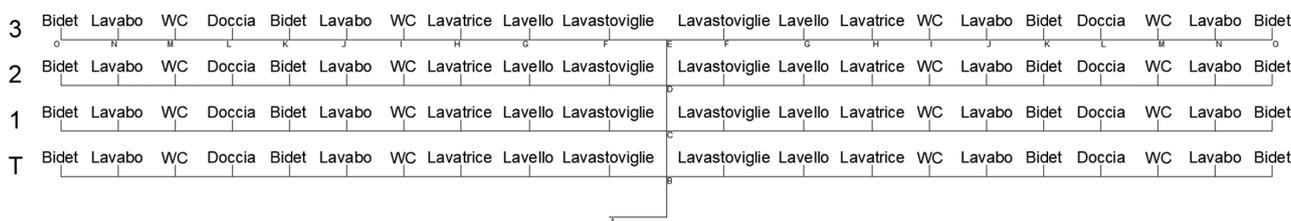


Figura 19: Schema distributivo dell'edificio tipo.

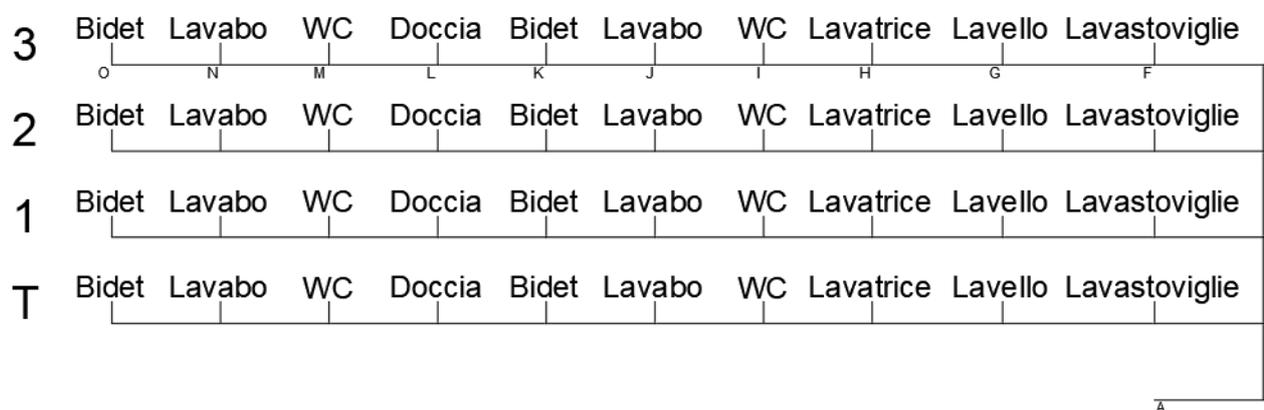


Figura 18: Schema distributivo dell'edificio tipo - ingrandimento.

Il dimensionamento dello schema di distribuzione domestica dipende da due riferimenti normativi differenti:

- UNI EN 806:2008 – Norma di riferimento europea, utilizzata per un dimensionamento tramite *metodo semplificato* per applicazioni tipiche (ad esempio residenziali);
- UNI 9182:2014 – Riferimento normativo italiano, suggerisce due tipologie di approcci nel dimensionamento: il *metodo semplificato* – che rimanda alla normativa europea – ed il *metodo analitico*, che richiede un calcolo di dettaglio specificato dalla norma.

In entrambi i metodi si prevede l'individuazione degli apparecchi sanitari da alimentare per ciascun tratto della tubazione da dimensionare. A ciascuna tipologia di apparecchio è associata una *portata unitaria*, espressa anche sotto forma di *unità di carico UC*, corrispondente a dieci volte la portata unitaria espressa in L/s. La portata totale dunque risulta dalla somma delle unità di carico dei singoli apparecchi.

Si riportano di seguito i dati relativi all'edificio tipo considerato in questa applicazione.

Edificio tipo			UNI EN 806:2008		UNI 9182:2014					
N. livelli: 4	N/Uab	N/piano	Qunit	UC	Qunit,AC+AF	UC,AC+AF	Qunit,AC	UC, AC	Qunit,AF	UC, AF
Uab/livello: 2	(-)	(-)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(L/s)
WC	2	4	0.2	2	0.3	3	0	0	0.3	3
Bidet	2	4	0.1	1	0.1	1	0.075	0.75	0.075	0.75
Doccia	1	2	0.2	2	0.2	2	0.15	1.5	0.15	1.5
Lavabo	2	4	0.1	1	0.1	1	0.075	0.75	0.075	0.75
Lavastoviglie	1	2	0.2	2	0.2	2	0	0	0.2	2
Lavatrice	1	2	0.2	2	0.2	2	0	0	0.2	2
Lavello cucina	1	2	0.2	2	0.2	2	0.15	1.5	0.15	1.5
Tot./Uab		10	3.2	32	3.6	36	1.2	12	3.2	32
Tot./piano		20	6.4	64	7.2	72	2.4	24	6.4	64
Tot.		80	25.6	256	28.8	288	9.6	96	25.6	256

Tabella 6-1: Unità di carico ai sensi delle normative UNI EN 806:2008 e UNI 9182:2014 per l'edificio in oggetto. Si osservi in particolare come la normativa italiana effettui una distinzione tra la fornitura di acqua calda e la fornitura di acqua fredda, mentre la normativa europea si occupa unicamente di definire le unità di carico totali.

6.1 Dimensionamento ai sensi della norma UNI EN 806:2008

Il metodo semplificato della normativa italiana rimanda al testo normativo europeo, in cui il dimensionamento dell'impianto si effettua attraverso i seguenti passaggi:

- Partendo dall'ultimo allaccio collegato alla rete – il più alto e distante dalla colonna montante, corrispondente in questa applicazione al bidet nel punto O – si sommano progressivamente le unità di carico in ciascun tratto della tubazione;
- In base al materiale della tubazione e alle unità di carico calcolate si determina il diametro di ciascuna tubazione tramite una tabella indicata in normativa.

ΣUC	Unità di Carico (UC)	3	4	5	6	10	20	55	180	540	1300	2200*	3400*
UC_{max}	UC			4	5	5	8						
$d_e \times s$	mm	16x2.25/16x2			18x2	20x2.5	26x3	32x3	40x3.5	50x4	63x4.5	75x5	90x7
d_i	mm	11.5/12			14	15	20	26	33	42	54	65	76
Max lunghezza tubo	m	9	5	4									

Tabella 6-2: Tabella di riferimento per la determinazione dei diametri delle tubazioni secondo il metodo semplificato.

Si riportano di seguito i dati ottenuti nel dimensionamento e, congiuntamente, un confronto con la normativa italiana in merito alla somma delle unità di carico presenti ed alla portata di progetto desunta dalle curve di contemporaneità, diagrammi che consentono di stimare la portata di progetto in funzione della portata totale. In particolare, mentre il diagramma è univoco per la normativa europea ed associato ad impianti *normalizzati*, ovvero con apparecchi usuali, utilizzo simultaneo tradizionale e non destinati ad un uso continuo di acqua superiore ai 15 minuti, la normativa italiana presenta due grafici distinti a seconda della tipologia di utenza, con curve di contemporaneità distinte in base alla natura dei vasi dell'impianto – oggi tipicamente a cassetta.



Dimensionamento ai sensi della UNI EN 806:2008					
ΣUC (L/s)	U_{cmax} (L/s)	Q_m (L/s)	Tratto (-)	Unità di Carico totali (L/s)	De x s (mm)
256	2	1.6	NO	1	16x2.25/16x2
Portata ai sensi della UNI 9182:2014			MN	2	16x2.25/16x3
$\Sigma UC, AC$ (L/s)	Tipo vaso (-)	Q_m (L/s)	LM	4	16x2.25/16x4
			KL	6	18x2
288	Cassetta	6.2	JK	7	20x2.5
Confronto tra le normative			IJ	8	20x2.5
$\Delta \Sigma UC$ (L/s)	Q_{mIT}/Q_{mEU} (-)		HI	10	20x2.5
			GH	12	26x3
32	3.875		FG	14	26x3
			EF	16	26x3
			DE	32	32x3
			CD	64	32x3
			BC	192	50x4
			AB	256	50x4

Tabella 6-3: Dimensionamento dell'impianto ai sensi della norma UNI EN 806:2008.

6.2 Dimensionamento ai sensi della norma UNI 9182:2014 – metodo analitico

Il dimensionamento dell'impianto sanitario secondo il metodo analitico – utilizzato unicamente per il dimensionamento dell'impianto di fornitura dell'acqua calda sanitaria – prevede i seguenti passaggi:

- Indicare per ciascun tratto la portata in unità di carico;
- Convertire le unità di carico in portate di progetto attraverso le curve di contemporaneità;
- Determinare il diametro minimo delle tubazioni in base all'equazione di continuità ($Q_m = \sigma \cdot v_{max}$);
- Conversione del diametro minimo in diametro commerciale e valutazione della conseguente velocità effettiva;
- Calcolo delle perdite di carico lungo la tubazione dal punto di alimentazione fino al punto di prelievo e verifica della compatibilità rispetto alla pressione disponibile;
- Nel caso di una rete di acqua calda, verificare i tempi di erogazione dell'acqua nell'utenza più sfavorita per determinare la necessità di ricircolo.

Nota la portata di progetto in ogni tratto, considerando il limite normativo imposto sulla velocità pari a 2.00 m/s per collettori di alimentazione, colonne montanti e tubazioni di distribuzione al piano, si possono calcolare le sezioni delle tubazioni – ed indirettamente i diametri minimi – tramite l'inverso dell'equazione sopracitata, come fatto per l'opera di adduzione²⁴:

$$Q = \sigma \cdot v = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v \Rightarrow D_{teorico} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot v}}$$

Essendo l'unità di riferimento per la definizione delle classi diametrali ad uso domestico il pollice, occorre convertire il dato ottenuto in detta unità di misura (1 in = 25.4 mm) per poter individuare le

²⁴ P.M. ESPOSITO, R.M. POLIDORO, A.L. ROSA, Op. cit., Par. 3, p. 10.

classi diametrali compatibili con quelle teoriche individuate. Da ciò si calcolano le velocità effettive dell'acqua nel suo fluire nelle tubazioni.

Per il calcolo delle perdite di carico distribuite, è possibile utilizzare opportuni diagrammi che, in funzione del materiale della tubazione e della temperatura di esercizio, forniscono le perdite di carico distribuite per unità di lunghezza – espresse in mm/m – al variare della portata di progetto Q_m – espressa in L/h – o della velocità effettiva espressa in m/s.

Alle perdite di carico distribuite si sommano le perdite di carico concentrate, calcolate come aliquota dell'altezza cinetica in base ad un coefficiente di proporzionalità ξ , detto *coefficiente di perdita*, funzione del tipo di pezzo speciale impiegato e della relativa resistenza localizzata.

Si riportano di seguito i dati alla base del dimensionamento secondo il metodo analitico, assumendo una pressione al punto di prelievo di 40 bar (equivalentemente, 40 m), una quota dell'allaccio dell'utenza più sfavorita di 10 m (9m + 1m di sicurezza per tener conto del distacco verticale dell'apparecchio dalla pavimentazione) e perdite di carico tra il collettore e l'utenza più sfavorita nell'ordine dei 0.2 bar:

Dimensionamento ai sensi della UNI 9182:2014							
$\Sigma UC, AC$ (L/s)	Tipo vaso (-)	Q_m (L/s)	P,prelievo (bar)	$z, sfav$ (m)	T, AC (°C)	$\Delta P, coll.-sfav$ (bar)	Materiale Tubazione
96	Cassetta	3	4	10	80	0.2	Acciaio

Tabella 6-4: Dati di riferimento per il dimensionamento dell'impianto di acqua calda sanitaria secondo metodo analitico.

Ne seguono i seguenti dati di dimensionamento:

Dimensionamento e valori di progetto									
Tratto (-)	L (m)	$\Sigma UC, AC$ (L/s)	Q_m (L/s)	v_{max} (m/s)	Dt (mm)	Dcomm (in)	Dcomm (mm)	v_{eff} (m/s)	Q_m (L/h)
AB	3	96	3.30	2	45.83	1 $\frac{1}{8}$	47.63	1.85	11880
BC	3	72	2.45	2	39.49	1 $\frac{1}{8}$	41.28	1.83	8820
CD	3	48	1.90	2	34.78	1 $\frac{3}{8}$	34.93	1.98	6840
DE	3	24	1.20	2	27.64	1 $\frac{1}{8}$	28.58	1.87	4320

Tabella 6-5: Dimensionamento dell'impianto di acqua calda sanitaria secondo metodo analitico.

E, di conseguenza, i seguenti dati relativi alla verifica:

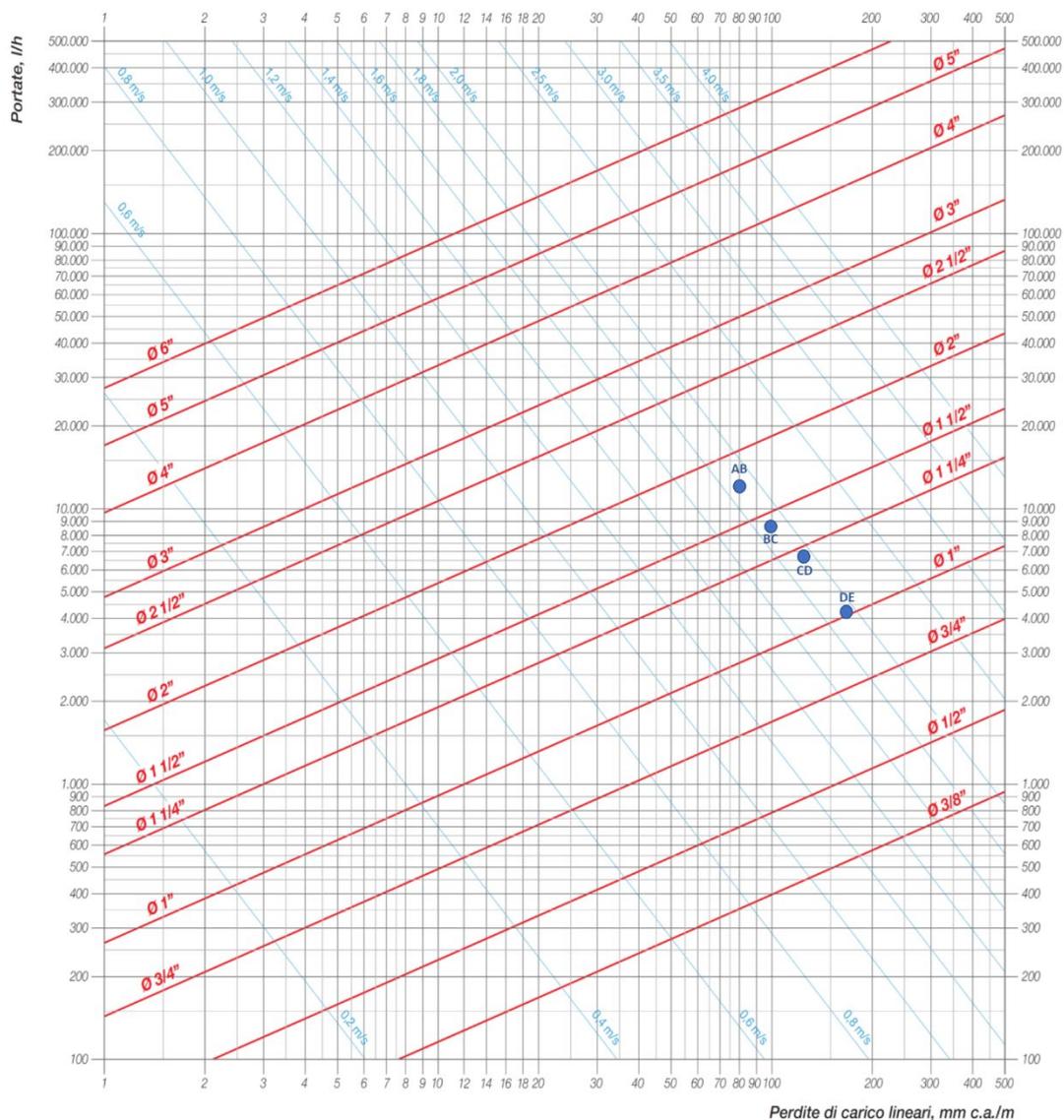


Perdite di carico e verifica						
ΔH_u (mm/m)	ΔH_{distr} (mm)	ξ curva 90° (-)	$\Delta h_{conc.}$ (m)	ΔH_{tot} (m)	$\Delta H_{verifica}$ (m)	Verificato? (s/n)
80	240	1.5	0.44	3.21	20.21	Sì
85	255	ξ diram.T	0.43	Tempo di erogazione (s)		Ricircolo?
140	420	1.0	0.50	22.61		No
160	480	ξ tot.	0.45			
Tot.	1395	2.5	1.81			

Tabella 6-6: Calcolo delle perdite di carico e verifica dell'impianto.

In particolare, avendo considerato Acciaio alla temperatura di esercizio di 80 °C, si riportano i valori di perdite di carico distribuite valutati sul diagramma di riferimento:

Perdite di carico continue TUBI IN ACCIAIO (pollici) - Temperatura acqua = 80°C



7. Manufatti di appoggio in una rete di distribuzione

Per garantire il corretto funzionamento del sistema di distribuzione idrica è necessario prevedere lungo il tracciato delle particolari opere d'arte e manufatti: pozzetto di scarico, pozzetto di nodo ed idranti. Di seguito vengono descritte le principali funzionalità di questi sistemi, mentre per la loro rappresentazione grafica si rimanda alla *Tavola 3*.

10.1 Pozzetto di scarico

I pozzetti di scarico vanno collocati nei punti più bassi dei tratti della rete, con lo scopo di garantire lo svuotamento delle tubazioni in caso di manutenzione. All'interno dei pozzetti, aventi pareti ordinariamente in calcestruzzo armato, sono presenti saracinesche, pezzi a T ed altri pezzi speciali flangiati, il cui collegamento con le tubazioni della rete è garantito attraverso dei connettori a *bout* o a *toulipe*, con un'estremità flangiata ed una che si adatta alla conformazione dell'estremità della tubazione in ghisa (a spigolo vivo o con bicchiere). Per lo scarico dell'acqua dal pozzetto nell'opera di drenaggio urbano si prevedono chiusure idrauliche sifonate, così da evitare la fuoriuscita di odori. In sintesi, l'opera è del tutto analoga a quella progettata nell'opera di adduzione²⁵.

10.2 Pozzetto di nodo con scarico

I pozzetti di nodo vengono posti in tutti i nodi della rete per garantire efficaci interventi di manutenzione in dette sezioni, critiche a causa della convergenza di più tratti. In virtù dell'elevato numero di pezzi speciali impiegati, è necessario prevedere giunti di smontaggio e, in prossimità dei punti alti per una tubazione, sfiati per le emulsioni di aria ed acqua dovute ad eventuali cambiamenti repentini di portata o pressione. Per minimizzare le interruzioni del servizio di fornitura idrica in caso di manutenzione è preferibile – pur non essendo economicamente conveniente – prevedere delle saracinesche in corrispondenza di ogni tratto convergente nel nodo.

10.3 Idranti

Ipotizzando che il centro abitato per il quale è stato attuato il dimensionamento sia dotato di presidio dei Vigili del Fuoco, come opera adibita all'estinzione degli incendi è stato previsto un sistema di idranti, particolari prese in carico destinate al servizio antincendio (per l'inserimento diretto delle lance o per il rifornimento delle autobotti). Si è previsto di adottare per il progetto degli idranti di tipologia *sottosuolo* – tipologia più diffusa in Italia – che vanno posizionati a 5-10 m dal perimetro dell'edificio (la distanza è proporzionale all'altezza dell'edificio) ed a una distanza mutua di 50-100 m. Essi richiedono l'utilizzo di un *collo a cigno* con attacco a baionetta per consentire la connessione alle manichette dei Vigili del Fuoco, dunque alle lance di erogazione.

²⁵ P.M. ESPOSITO, R.M. POLIDORO, A.L. ROSA, Op. cit., Tav. 1.



Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Corso di Laurea Magistrale a Ciclo unico in Ingegneria Edile – Architettura

Corso di Costruzioni Idrauliche

Anno Accademico 2022 – 2023

