

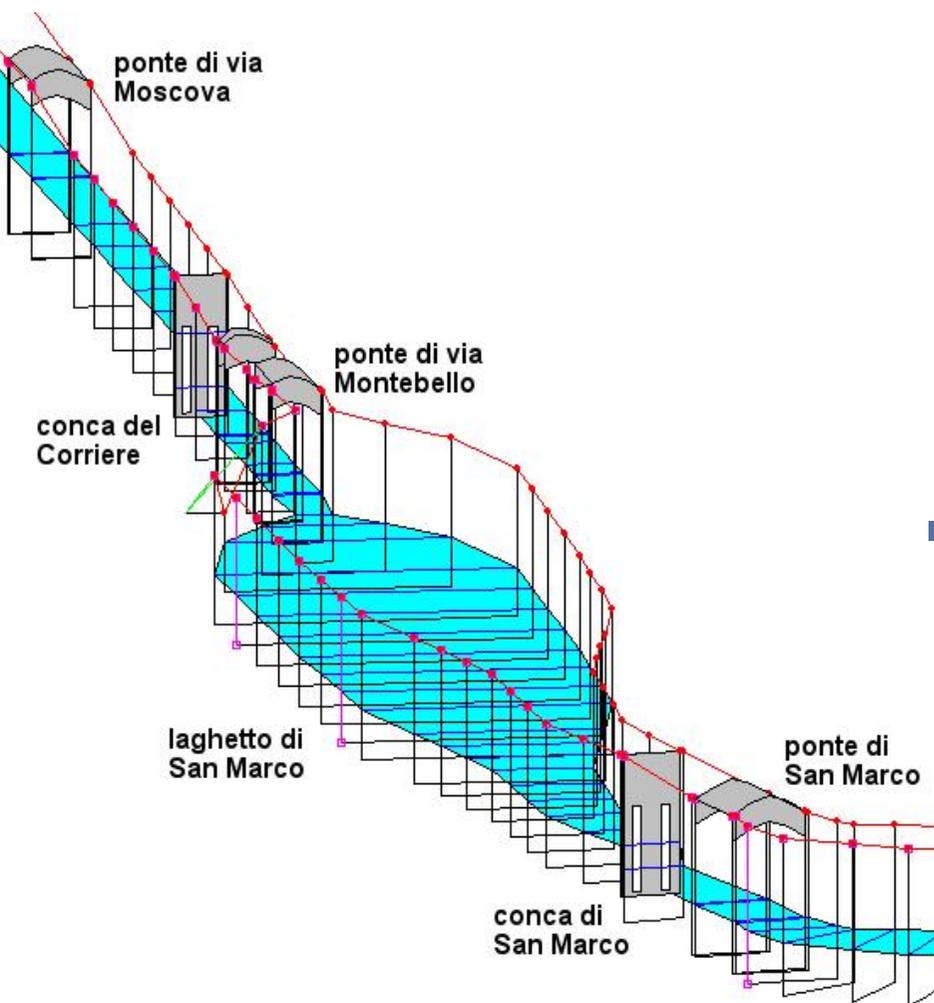
ATTIVITÀ DI RICERCA SCIENTIFICA E TECNICA FINALIZZATE ALLO

**STUDIO DI FATTIBILITÀ PER LA  
RIAPERTURA DEI NAVIGLI MILANESI  
NELL'AMBITO DELLA RIATTIVAZIONE  
DEL SISTEMA COMPLESSIVO DEI  
NAVIGLI E DELLA SUA NAVIGABILITÀ**

---

**VOLUME II**





## FATTIBILITÀ IDRAULICA, IDROLOGICA E IDROGEOLOGICA

- 4.1 Fattibilità idraulica e idrogeologica
- 4.2 Ipotesi preliminare di fattibilità geologica ed idrogeologica
- 4.3 Proposta metodologica di indagine del sottosuolo urbano propedeutica alla fase di progettazione



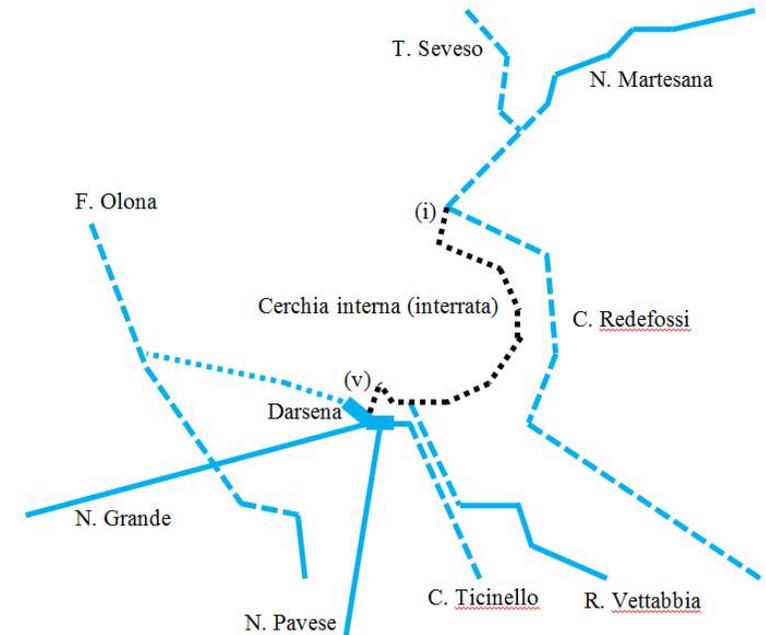
## 4.1 FATTIBILITÀ IDRAULICA E IDROLOGICA

Stefano Sibilla, Renzo Rosso, Maria Crisrina Sciandra, Carlotta Lamera, Maurizio Brown

Fino al momento della copertura per ragioni igieniche nel 1929, la Cerchia dei Navigli garantiva la continuità idraulica del sistema dei Navigli all'interno della città di Milano, connettendo il Naviglio della Martesana, che deriva le proprie acque dal fiume Adda e riceve, in via M. Gioia, le acque del torrente Seveso, alla Darsena di Porta Ticinese, a cui affluisce il Naviglio Grande derivato dal fiume Ticino e da cui ha origine il Naviglio Ticinese, che confluisce infine nel fiume Ticino a Pavia.

Prescindendo dalle rogge e cavi minori che avevano origine dalla Martesana e dalla Cerchia interna, il sistema nelle sue grandi linee era completato da tre scaricatori: il cavo Redefossi, con origine al ponte delle Gabelle e funzioni di scaricatore delle piene del Seveso e del naviglio della Martesana; la roggia Vettabbia, con origine al cosiddetto Fugone di via Molino delle Armi e funzioni di scaricatore della Cerchia Interna; il cavo Ticinello, con origine dalla Darsena e funzioni di scaricatore terminale del Naviglio Grande.

La copertura e il successivo interrimento della Cerchia interna hanno determinato la segmentazione del sistema e la disconnessione idraulica delle varie componenti (Figura 4.1.1). Oggi il Naviglio della Martesana scorre a cielo aperto fino a Cassina de' Pomm per continuare il suo percorso tombinato nel tratto in via M. Gioia; dopo aver ricevuto la confluenza del Seveso, termina infine il suo corso al ponte delle Gabelle, dove scarica la propria portata residua, unitamente a quella del Seveso, nel cavo Redefossi.



**FIG. 4.1.1**  
Schema dell'idrografia dell'area urbana di Milano.

Il sistema Naviglio Grande – Darsena – Naviglio Pavese mantiene invece una propria continuità periferica, mentre la roggia Vettabbia è alimentata da pozzi di prima falda, in parte collettati attraverso il canale Grande Seveso nel centro di Milano, e da acqua depurata dell'impianto di Nosedo.

La riattivazione del canale storico in città (o, in diversi tratti, la costruzione di un manufatto completamente nuovo che ripercorre il tracciato e l'altimetria di quello storico) comporta pertanto la soluzione di numerosi problemi di tipo idraulico, idrologico e igienico. Oggetto del presente Capitolo è pertanto la valutazione della fattibilità idraulico-idrologica di tale intervento, allo scopo di recuperare le funzioni ambientali, paesaggistiche, energetiche e di canale navigabile di un sistema idrico complesso.

Verificare la reale compatibilità idraulico-idrologica del sistema dei canali milanesi da Cassina de' Pomm, dove oggi termina il percorso a cielo aperto del Naviglio della Martesana, lungo Via Melchiorre Gioia, Via San Marco e la Cerchia Cerchia interna, fino a raggiungere la conca di Viarenna, attraverso cui si attua la riconnessione funzionale con la Darsena e con il sistema costituito dai Navigli Grande e Pavese, si traduce in una analisi di valutazione della portata d'acqua necessaria e disponibile ad alimentare l'intero tratto descritto. Stabilire una portata tale da garantire buone condizioni igieniche, evitando ristagno, cattivi odori e crescita algale, comporta anche un'analisi sullo stato di qualità delle acque derivate per l'alimentazione della Cerchia interna.

Stabilito il valore di riferimento della portata, lo studio di fattibilità idraulica ha comportato, in sinergia continua con lo sviluppo dello studio di fattibilità architettonica e urbanistica, la verifica della velocità della corrente, del tirante idrico e dei tiranti d'aria sotto i ponti, in modo tale da garantire sia la fruibilità del Naviglio per una navigazione di tipo turistico (e, quindi, la manovrabilità, il pescaggio dei natanti e il mantenimento di una luce sufficiente per il passaggio

al di sotto dei ponti), sia la visibilità della superficie idrica dalle alzaie, in modo da massimizzarne la valenza paesaggistica e di interazione con il contesto monumentale. La necessità di mantenere la quota della superficie libera costante e, il più possibile, elevata, ha portato anche a formulare un'ipotesi di localizzazione e di dimensionamento di conche di navigazione lungo tutto il percorso del canale riaperto.

La conoscenza delle portate, delle velocità e delle quote della superficie idrica ha reso quindi possibili sia la stima dei tempi di navigazione lungo il canale riaperto, sia una valutazione preliminare della possibilità di sfruttare i salti di fondo del canale per una piccola produzione idroelettrica.

Infine, dato che l'utilizzazione del Naviglio riaperto come canale navigabile presuppone, per ragioni di sicurezza idraulica e di controllo della qualità delle acque, la disconnessione idraulica del torrente Seveso dal Naviglio della Martesana, si è effettuato un dimensionamento preliminare del canale scaricatore delle acque del Seveso dalla sua attuale confluenza in Martesana all'incrocio tra via Carissimi e via Melchiorre Gioia fino al suo sbocco nel cavo Redefossi.

Riassumendo, lo studio di fattibilità idraulica per la riapertura dei Navigli milanesi si pone i seguenti obiettivi:

1. determinare la portata che è necessario garantire nella Martesana e nella Cerchia dei Navigli per assicurare buone condizioni igieniche per la fruibilità del corso d'acqua;
2. valutare la disponibilità della portata richiesta di acqua di buona qualità;
3. determinare il livello idrico necessario a garantire la navigabilità del canale nei diversi tratti, in base alla tipologia prevista per le imbarcazioni proposte;

4. valutare il numero e la localizzazione delle conche di navigazione, allo scopo sia di superare i salti di fondo, sia di garantire in ogni tratto un livello idrico tale da permettere sia la navigabilità nel canale, sia la buona visibilità della superficie libera dalle sponde;
5. stimare i tempi di navigazione lungo il canale;
6. effettuare una stima preliminare dell'eventuale producibilità elettrica ottenibile dall'installazione di impianti mini-idroelettrici in corrispondenza alle conche di navigazione;
7. elaborare una proposta per la disconnessione idraulica tra il torrente Seveso e il Naviglio della Martesana e verificarne la fattibilità.

### 4.1.1 | PROFILO ALTIMETRICO E IDRAULICO DEL CANALE

La determinazione delle caratteristiche idrauliche del canale ha richiesto la realizzazione di un modello idraulico del Naviglio della Martesana, del Naviglio di San Marco e della Cerchia interna da Cassina de' Pomm alla Darsena, per una lunghezza complessiva di 8.1 km. Il modello è stato realizzato utilizzando il software Hec-Ras<sup>1</sup>, che risolve le equazioni delle correnti a superficie libera in moto permanente, permettendo di calcolare, in funzione della portata defluente, i valori del tirante e della velocità della corrente in ogni sezione del canale.

La predisposizione del modello idraulico richiede la conoscenza della geometria del canale che, nella fase iniziale del progetto, era largamente incognita. Infatti, nonostante l'obiettivo generale dello studio di fattibilità sia la riapertura del Naviglio milanese lungo via Melchiorre Gioia, via San Marco e la Cerchia dei Navigli fino alla

<sup>1</sup> US Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center, HEC-RAS River Analysis System 4.1.0.

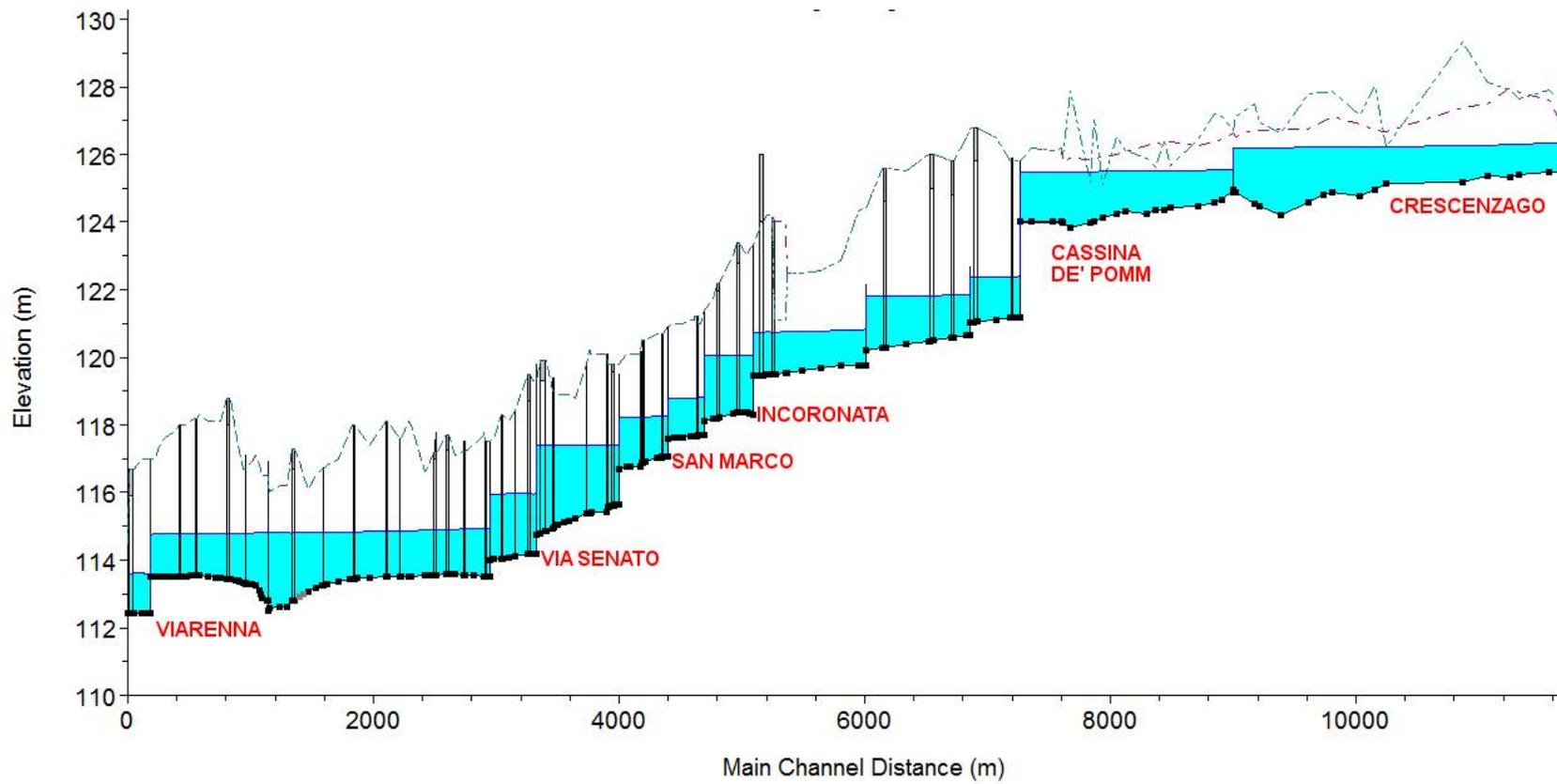
Darsena e, quindi, il tracciato ricalchi quasi esattamente quello del Naviglio storico, il profilo altimetrico del fondo e la larghezza del canale sono oggi vincolati dalle necessità della città odierna, dovendosi garantire sia l'accesso agli edifici sorti in sponda destra dopo il 1929, sia la realizzazione di ponti con quota dell'estradosso coincidente con il piano strada attuale, in modo da non creare ostacoli al traffico veicolare e tramviario.

La prima valutazione della portata è stata quindi effettuata sulla base di una geometria ipotetica, basata su un'altimetria del fondo coincidente con quella storica (tranne che per il Naviglio della Martesana in via Melchiorre Gioia, per cui già dalla fase preliminare si prevedeva una realizzazione ex-novo) e su una larghezza stimata sulla base delle prime considerazioni progettuali. La scelta di far corrispondere l'altimetria del fondo a quella storica nasce essenzialmente dall'esigenza di un eventuale recupero, ove fattibile, di parte dei manufatti storici ritrovabili lungo lo scavo del nuovo canale.

Questa prima fase ha portato alla definizione di una portata di riferimento, sulla cui base si è effettuata la prima stima delle quote della superficie libera. Attraverso un processo iterativo che ha coinvolto sia la fase di progettazione urbanistico-architettonica che quella di progettazione idraulica, si è quindi giunti ad una configurazione definitiva, che è stata poi adottata nella versione finale del progetto.

Il profilo altimetrico definitivo adottato nel modello idraulico è riportato in Figura 4.1.1.1 unitamente al profilo idraulico calcolato. Da monte a valle, si possono notare:

- un primo tratto che rappresenta l'ultimo tratto del Naviglio della Martesana tuttora a cielo aperto: in particolare, è rappresentato il tratto compreso tra il ponte di piazza Costantino a Crescenzago e la sezione di Cassina de' Pomm, dove inizia l'intervento di ripristino del Naviglio e dove la



**FIG. 4.1.1.1**  
 Schema dell'idrografia dell'arca urbana di Milano

quota del fondo è pari a 124.1 m s.l.m.; il tratto è rappresentato con la geometria attuale, mantenendo in opera la soglia dell'idrometro del ponte di v.le Monza, che determina una disconnessione idraulica; per considerazioni idrauliche relative al ripristino della navigazione in questo tratto si rimanda al paragrafo 2.2.2.4.

- il tratto ripristinato del Naviglio della Martesana in via M. Gioia, con tratti a pendenza costante e 3 conche di navigazione;
- il Naviglio di San Marco, compreso tra la conca dell'Incoronata (ripristinata) e il laghetto di San Marco;
- il tratto alto della Cerchia interna, da San Marco alla conca di via Senato, con 3 conche di navigazione e profilo altimetrico del fondo mantenuto, ove possibile, coincidente con quello storico, caratterizzato da una pendenza elevata (superiore all'1 ‰) nel tratto di via Fatebenefratelli e via Senato;
- il tratto basso della Cerchia interna, da via Senato a via De Amicis, con profilo altimetrico del fondo mantenuto, ove possibile, coincidente con quello storico, con il caratteristico andamento in contropendenza nei tratti di via Visconti di Modrone e di via Molino delle Armi – via De Amicis; il tratto, originariamente privo di conche di navigazione, ne prevede ora una in corrispondenza al ponte di via Mascagni per necessità progettuali;
- il Naviglio del Vallone, con la conca di Viarenna che dà accesso allo sbocco in Darsena.

La lunghezza complessiva del canale rappresentato nel modello ha quindi lunghezza complessiva pari a 11.7 km, di cui 7.6 km da riaprire o realizzare ex novo, per un dislivello complessivo di 11.6 m, di cui 8.8 m superati tramite salti di fondo in corrispondenza delle conche e i rimanenti 2.8 m con la pendenza del canale.

Si può notare che il profilo della superficie libera segue l'andamento a invasi successivi, caratteristico dei canali regolati da conche di navigazione, con quota praticamente costante del pelo libero; fa parziale eccezione il tratto basso della Cerchia interna, in cui la quota della superficie libera decresce di 16 cm tra via Visconti di Modrone e la conca di Viarenna.

Per quanto concerne i materiali che andranno a costituire sponde e fondo del canale ricreato, nonché i parapetti, si è tenuto conto della scelta progettuale di utilizzare sia per le sponde che per il fondo soluzioni compatibili con i materiali storici rinvenuti, quindi principalmente ceppo e mattoni a vista per le sponde, oltre alla possibilità di utilizzo del verde ornamentale, e cemento per il fondo.

E' altresì consigliabile l'impermeabilizzazione del fondo e delle sponde almeno nell'areale urbano per evitare perdite di portata e, soprattutto, per evitare ingenti apporti alla falda che, con il rilevante innalzamento avvenuto in corrispondenza della città di Milano, rappresentano un ulteriore carico. Il metodo di impermeabilizzazione dovrà essere scelto lungo tutto il tratto da riaprire, soprattutto in relazione alla necessità di mantenere le sponde storiche eventualmente rinvenute (quindi sponda sinistra orografica). Per quanto concerne il fondo, sussiste il vincolo posto dallo studio idrogeologico di garantirne la completa impermeabilità. Per le sponde, l'opzione è quella di agire sui fianchi esterni con sistemi che deviano il flusso d'acqua assorbita dal terreno, impedendogli di arrivare a lambire i locali interrati degli edifici vicini.

Nel seguito, si esaminano in dettaglio le caratteristiche geometriche e altimetriche dei vari tratti del canale.

### 4.1.1.1 Naviglio della Martesana in via Melchiorre Gioia

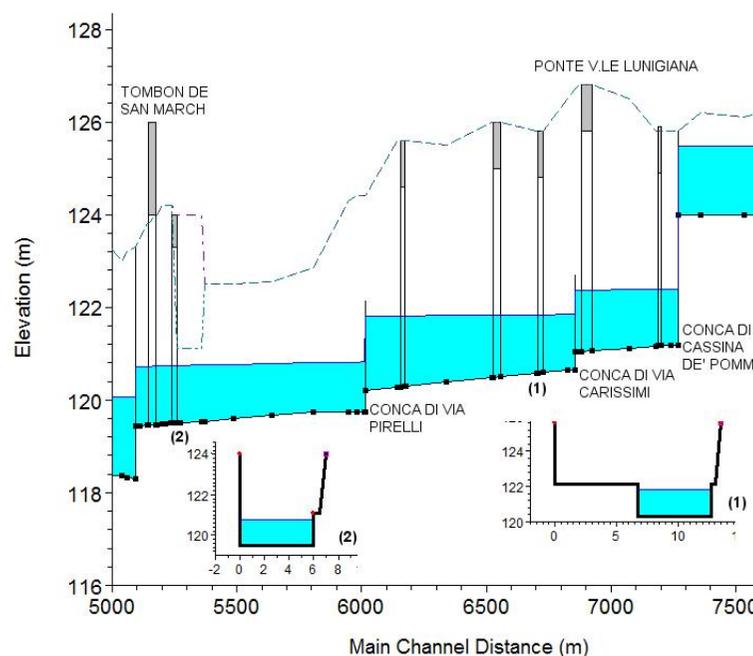
Il Naviglio della Martesana riaperto in via Melchiorre Gioia è rappresentato in figura 4.1.1.1.1. Di tale sezione terminale del Naviglio si prevede una completa riforma, con scavo di un nuovo canale di sezione rettangolare. A valle di Cassina de' Pomm, dove si raccorda al Naviglio oggi a cielo aperto, il canale presenta un primo tratto a pendenza nulla con fondo alla quota di 124 m s.l.m.; il tratto termina in corrispondenza alla ricostruita conca di Cassina de' Pomm, dove il fondo supera un dislivello di 2.81 m. I livelli nei successivi tratti sono regolati ad una quota costante attraverso tre conche di navigazione, due nuove – in corrispondenza a via Carissimi e a via Pirelli – e la conca esistente dell'Incoronata. L'introduzione di due conche nuove si è resa necessaria in quanto, alla portata di progetto, il solo rigurgito dovuto alle porte di monte della Conca dell'Incoronata era insufficiente per garantire livello costanti e adeguati alla navigazione lungo tutta la via Melchiorre Gioia.

I tre tratti hanno caratteristiche leggermente diverse:

- il primo, a valle della conca di Cassina de' Pomm, è lungo circa 380 m, presenta una pendenza costante dello 0.4 ‰, ha sezione rettangolare di larghezza costante pari a 6 m e alzaia sinistra ribassata e termina alla conca di via Carissimi
- con un salto di fondo di 39 cm; la quota della superficie libera risulta compresa tra 122.36 e 122.39 m s.l.m.;
- il secondo, a valle della conca di via Carissimi, è lungo circa 840 m, presenta una pendenza costante dello 0.5 ‰, ha sezione rettangolare di larghezza costante pari a 6 m e alzaia sinistra ribassata (vedi sez. **(1)** in figura 4.1.1.1.1) e termina alla conca di via Pirelli con un salto di fondo di 45 cm; la quota

della superficie libera risulta compresa tra 121.81 e 121.85 m s.l.m.;

- il terzo, a valle della conca via Pirelli, è lungo circa 930 m, presenta una pendenza costante dello 0.3 ‰, vincolata dalle quote del fondo di 119.75 m s.l.m. al passaggio sopra il tunnel della stazione M2 Gioia e di 119.45 m s.l.m. della sezione tuttora esistente a monte della Conca dell'Incoronata; in questo tratto il Naviglio ha sezione rettangolare di larghezza costante pari a 6 m, in parte in galleria e in parte notevolmente ribassata rispetto al piano strada (vedi sez. **(2)** in figura 4.1.1.1.1); la quota della superficie libera risulta compresa tra 120.73 e 120.82 m s.l.m.



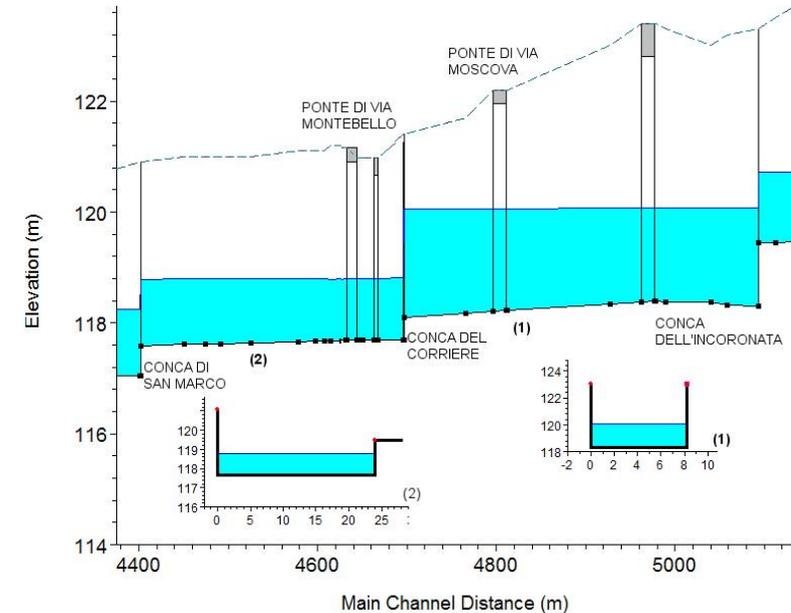
**FIG. 4.1.1.1.1**  
Sezioni tipiche e profilo altimetrico e idraulico del Naviglio della Martesana in via Melchiorre Gioia.

### 4.1.1.2 Naviglio di San Marco

Il Naviglio di San Marco è rappresentato in figura 4.1.1.2.1 e inizia in corrispondenza alla Conca dell'Incoronata riattivata. La necessità di mantenere l'integrità del manufatto storico vincola lo sviluppo altimetrico del canale, che deve necessariamente partire da una quota di fondo pari a 118.39 m s.l.m. a valle del manufatto. Analogamente, la presenza del ponte di via Montebello, la cui quota di intradosso non può essere elevata oltre 121.53 m s.l.m. limita la quota massima ipotizzabile per la superficie idrica: per risolvere queste criticità si è introdotta una nuova conca a metà del Naviglio di San Marco, in corrispondenza alla sede storica del Corriere della Sera.

Il Naviglio di San Marco risulta quindi composto di due tratti:

- il primo, tra la conca dell'Incoronata e quella del Corriere, è lungo circa 350 m, presenta una pendenza media dello 0.6 ‰, ha sezione rettangolare di larghezza variabile al più pari a 8 m (vedi sez. **(1)** in figura 4.1.1.2.1) e termina alla conca del Corriere con un salto di fondo di 41 cm; la quota della superficie libera è costante a 120.06 m s.l.m.;
- il secondo, a valle della conca del Corriere, è lungo circa 290 m, ed è costituito quasi completamente dal Laghetto di San Marco: è praticamente a pendenza nulla e la sezione si allarga per formare il bacino (vedi sez. **(2)** in figura 4.1.1.2.1); termina alla conca di via Pirelli con un salto di fondo di 45 cm; la quota della superficie libera è costante a 118.80 m s.l.m.



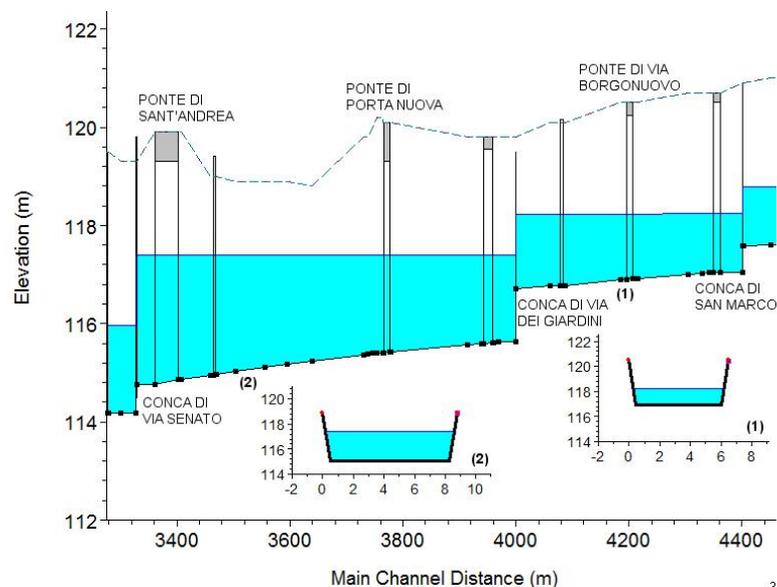
**FIG. 4.1.1.2.1**  
Sezioni tipiche e profilo altimetrico e idraulico del Naviglio di San Marco.

### 4.1.1.3 Cerchia interna tra San Marco e via Senato

Il tratto alto della Cerchia interna è rappresentato in figura 4.1.1.3.1 e inizia in corrispondenza alla curva del Naviglio in piazza San Marco. Originariamente presentava due conche di navigazione al ponte di via Borgonuovo e in via Senato, con un tratto a pendenza nulla a monte della conca intermedia e uno a pendenza superiore all'1 ‰ a valle. Nel progetto definitivo si è proposto uno spostamento della conca intermedia al ponte di via dei Giardini, mantenendo l'altimetria del fondo storico solo a valle di quest'ultima.

Il tratto alto della Cerchia interna risulta quindi composto di due tratti:

- il primo, a valle della conca di San Marco, è lungo circa 400 m, presenta una pendenza costante pari allo 0.85 ‰, ha sezione trapezia di larghezza variabile tra 6.5 e 7 m (vedi sez. **(1)** in figura 4.1.1.3.1) e pendenza delle sponde 1:8; termina alla conca di via dei Giardini con un salto di fondo di 1.08 m; la quota della superficie libera è compresa tra 118.22 e 118.25 m s.l.m.;
- il secondo, a valle della conca di via dei Giardini, è lungo circa 670 m, e ha profilo altimetrico coincidente con quello del fondo storico, con pendenza media pari all'1.3 ‰; la sezione trapezia è di larghezza variabile tra 5.3 e 8.8 m (vedi sez. **(2)** in figura 4.1.1.3.1) e pendenza delle sponde 1:8; termina alla conca di via Senato con un salto di fondo di 57 cm; la quota della superficie libera è costante e pari a 117.40 m s.l.m.



**FIG. 4.1.1.3.1**  
Sezioni tipiche e profilo altimetrico e idraulico del tratto di Cerchia interna compreso tra la conca di San Marco e quella di via Senato.

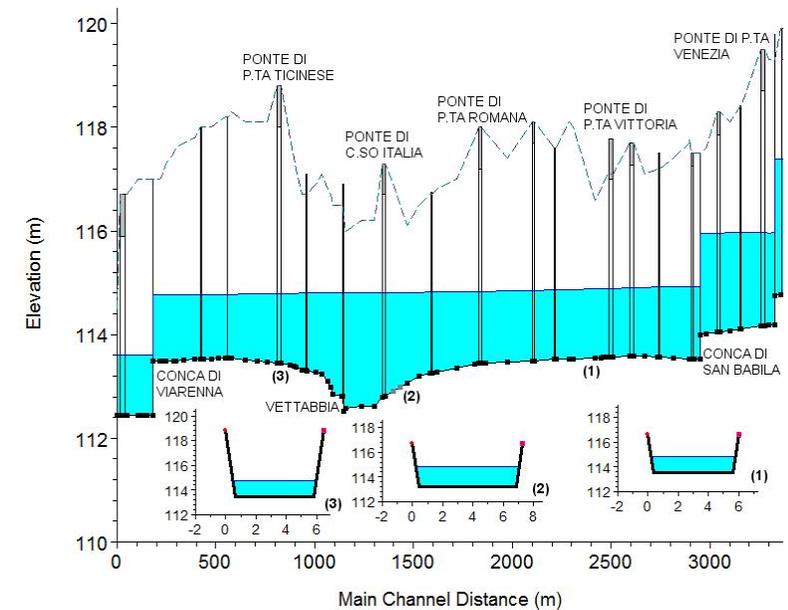
#### 4.1.1.4 Cerchia interna tra via Senato e conca di Viarenna

Il tratto basso della Cerchia interna è rappresentato in figura 4.1.1.4.1 e aveva storicamente inizio al ponte di Porta Venezia, a valle della conca di via Senato. Originariamente non presentava conche di navigazione fino alla curva che immetteva verso il Naviglio del Vallone e la conca di Viarenna. Allo scopo di evitare l'eccessiva distanza tra la superficie dell'acqua e il piano strada in via San Damiano, però, nel progetto definitivo si è introdotta un'ulteriore conca di navigazione a monte del ponte di via Mascagni, in corrispondenza alla stazione M4 San Babila, mantenendo l'altimetria del fondo storico solo a valle di quest'ultima.

Il tratto basso della Cerchia interna risulta quindi composto di due tratti:

- il primo, a monte della conca di San Babila, è lungo circa 350 m, presenta una pendenza costante pari allo 0.5 ‰, ha sezione trapezia di larghezza variabile tra 6.3 e 8.5 m e pendenza delle sponde 1:8; termina alla conca di San Babila con un salto di fondo di 48 cm; la quota della superficie libera è costante e pari a 115.96 m s.l.m.;
- il secondo, a valle della conca di San Babila, è lungo circa 2.8 km, e ha profilo altimetrico coincidente con quello del fondo storico, con tratti anche molto variabili; il tratto tra la conca di San Babila e il ponte di Porta Vittoria presenta una lieve contropendenza di -0.05 ‰; dal ponte di Porta Vittoria al ponte di Corso Italia, la pendenza aumenta gradualmente e, a valle di corso Italia, si raggiunge la quota minima del fondo, pari a 112.52 m s.l.m., in corrispondenza alla derivazione della roggia Vettabbia; per il tratto seguente si è ipotizzato di mantenere il profilo altimetrico in contropendenza del fondo

storico, anche per permettere alla roggia Vettabbia di mantenere la funzione di scaricatore principale della Cerchia interna; infine, il Naviglio del Vallone, collegamento tra via De Amicis e la conca di Viarenna, mantiene una leggera pendenza dello 0.05 ‰; la sezione di tutto il tratto basso della cerchia rimane trapezia, con larghezza compresa tra 6 e 8 m (vedi sez. (1) e (2) in figura 4.1.1.4.1) e pendenza delle sponde 1:8; la massima distanza del pelo libero dal piano strada si riscontra in corrispondenza al ponte di Porta Ticinese (vedi sez. (3) in figura 4.1.1.4.1); la quota della superficie libera decresce da 114.92 m s.l.m. a valle della conca di San Babila a 114.76 m s.l.m. a monte della conca di Viarenna.



**FIG. 4.1.1.4**  
Sezioni tipiche e profilo altimetrico e idraulico del tratto di Cerchia interna compreso tra la conca di via Senato e la conca di Viarenna.

## 4.1.2 | DETERMINAZIONE DELLA PORTATA DI PROGETTO

La corrente nel nuovo tratto terminale del Naviglio della Martesana e nella Cerchia interna deve avere, come accennato nel paragrafo precedente, caratteristiche idrauliche che garantiscano il mantenimento di corrette condizioni igieniche, la visibilità dalle sponde e la navigabilità da parte di imbarcazioni leggere con funzioni turistiche. Queste caratteristiche vincolano le velocità minime e massime della corrente, i tiranti d'acqua minimi da garantire per rendere possibile il pescaggio dei natanti, le luci minime da mantenere per garantire il passaggio sotto i ponti e la distanza tra superficie libera dell'acqua e piano strada.

La determinazione della portata necessaria per alimentare il Naviglio riaperto, quindi, deriva direttamente dal rispetto delle sopracitate condizioni su velocità e livello della corrente. Tali condizioni si possono riassumere nelle seguenti:

- la velocità dell'acqua deve essere abbastanza elevata da impedire depositi, esalazioni ed un eccessivo sviluppo di vegetazione e insetti: un valore di riferimento per la velocità minima adottato nella pratica tecnica è quello che può essere assunto anche come valore minimo per evitare il deposito in alveo di sedimenti limosi (dato che l'alimentazione del Naviglio riaperto potrà essere effettuata sia tramite apporti dalla Martesana, canale con funzioni irrigue, sia tramite acqua di falda, può essere esclusa la presenza di materiale sedimentabile di granulometria maggiore); la grandezza di riferimento per valutare la risospensione dei sedimenti limosi ad opera della turbolenza vicino al fondo è la cosiddetta velocità d'attrito  $u^*$ , per cui si richiede il rispetto della condizione  $u^* < 1$  cm/s; dato che il calcolo della velocità di attrito presuppone la conoscenza delle caratteristiche

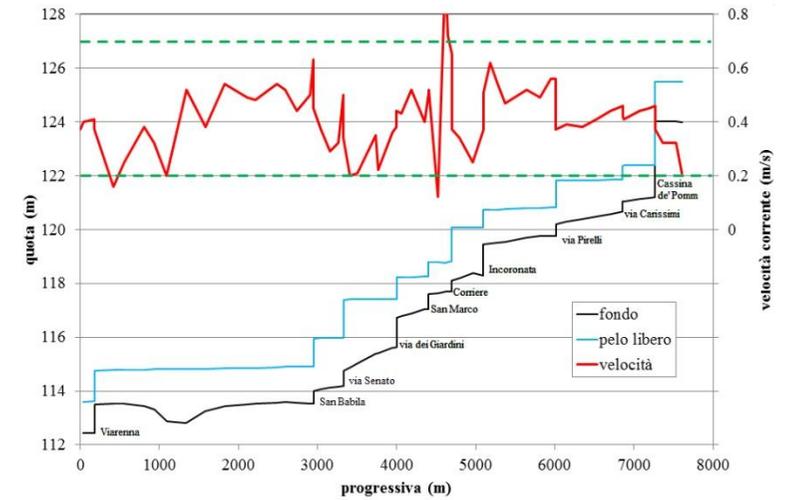
idrauliche della corrente, che non sono note *a priori*, si è imposto preliminarmente come valore minimo da garantire per la velocità media della corrente il valore di 0.2 m/s, verificando *a posteriori* il rispetto della condizione sulla velocità d'attrito;

- la velocità dell'acqua deve essere abbastanza bassa da garantire la manovrabilità dei natanti: considerato che si intende proporre, per il Naviglio riaperto, una fruizione di tipo essenzialmente turistico con imbarcazioni leggere, data anche la ridotta larghezza del canale nella Cerchia interna (nell'ordine dei 6-8 m), considerando la velocità massima delle imbarcazioni in servizio sui Navigli Grande e Martesana (4 nodi) si è ritenuto ragionevole richiedere che la velocità della corrente generalmente non superi 0.7 m/s;
- il tirante d'acqua deve essere abbastanza elevato da garantire il pescaggio dei natanti: considerato il pescaggio di 0.6 m necessario alle imbarcazioni previste per la navigazione lungo la Cerchia (vedi paragrafo 4.1.4), si ritiene che la navigazione possa svolgersi in sicurezza con un tirante almeno pari a 1.1 m;
- la luce tra la superficie libera e l'intradosso dei ponti deve essere tale da garantire il passaggio delle imbarcazioni: il valore minimo per permettere il passaggio delle imbarcazioni previste per la navigazione lungo la Cerchia (vedi paragrafo 4.1.4) è di 1.9 m.

La valutazione condotta durante lo studio di pre-fattibilità, sulla base di una geometria preliminare del canale, ha portato a concludere che una portata compresa tra 3 e 4 m<sup>3</sup>/s porta a velocità comprese tra i minimi e i massimi sopra richiesti.

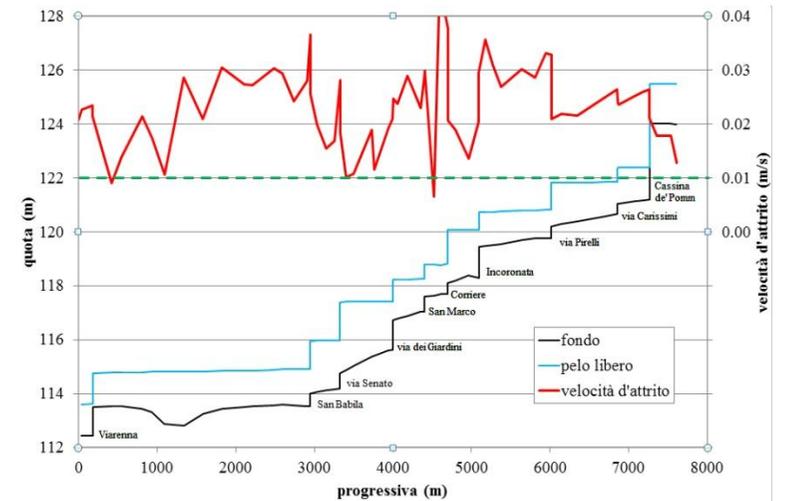
Tale valutazione preliminare è confermata dalle velocità medie della corrente (figura 4.1.2.1) calcolate nelle sezioni significative della configurazione definitiva del tratto terminale del Naviglio della Martesana e della Cerchia interna, per le portate determinate come descritto nel successivo paragrafo 4.1.3.

Il calcolo a posteriori delle velocità d'attrito (figura 4.1.2.2) conferma la validità delle scelte effettuate dal punto di vista del mantenimento degli adeguati standard di condizioni igieniche nella Cerchia riaperta.



**FIG. 4.1.2.1**

Andamento della velocità media della corrente lungo il tratto terminale del Naviglio della Martesana e la Cerchia interna.



**FIG. 4.1.2.2**

Andamento della velocità d'attrito lungo il tratto terminale del Naviglio della Martesana e la Cerchia interna.

### 4.1.3 | DISPONIBILITÀ DELLA PORTATA DI PROGETTO

Fino al momento della chiusura, l'alimentazione della Cerchia interna è stata garantita dal Naviglio della Martesana, che convogliava in Milano le proprie acque residue derivate dall'Adda a Concesa. Tale corso d'acqua artificiale è stato realizzato nel XV secolo con lo scopo principale di fornire acqua alle utenze agricole poste nella pianura a est di Milano. Nonostante la principale finalità fosse appunto quella irrigua, il naviglio veniva utilizzato anche come via d'acqua e alla fine del XV secolo fu collegato alla cerchia dei navigli di Milano e quindi alla darsena di Porta Ticinese. A queste acque si aggiungeva la portata convogliata dal torrente Seveso, che ancora oggi confluisce nel Naviglio della Martesana a metà di via Melchiorre Gioia. In caso di piena del torrente Seveso, le portate in eccesso erano deviate nel cavo Redefossi attraverso il manufatto scaricatore del Ponte delle Gabelle. Le possibili fonti di alimentazione di una portata d'acqua alla Cerchia interna sono oggi sostanzialmente le stesse, con l'aggiunta di un contributo derivante dagli impianti a pompe di calore che oggi scaricano le proprie acque nella tombinatura del Naviglio della Martesana. Tali fonti sono quindi:

- la portata residua nel Naviglio della Martesana al netto delle perdite idrologiche da infiltrazione;
- la portata alla sezione terminale del torrente Seveso (oggi pari, in regime di magra, a circa 1.5 m<sup>3</sup>/s);
- la portata derivata dai pozzi che alimentano gli impianti a pompe di calore del quartiere Porta Nuova.

E' necessario a tal proposito effettuare una duplice analisi sulle portate di alimentazione della Fossa Interna: una riguardante la qualità delle acque derivate; l'altra relativa alla effettiva disponibilità delle portate erogabili dalla Martesana.

Allo stato attuale è stato verificato che, dal punto di vista qualitativo, la Martesana costituisce l'unico corpo idrico superficiale da cui sia possibile derivare la portata con cui alimentare la Cerchia interna: il suo indice LIM (Livello di Inquinamento da Macrodescrittori) assume quasi costantemente il valore 2 (buono). Il torrente Seveso non può essere invece incluso nelle fonti di approvvigionamento idrico a causa del degrado che deriverebbe dall'elevata concentrazione di inquinanti presenti nelle sue acque, caratterizzate da un indice LIM quasi sempre pari a 5 (cattivo).

Come esposto nel paragrafo 4.1.2, il modello idraulico porta ad una stima del valore di portata necessario al buon funzionamento del Naviglio riaperto compreso tra i 3 e i 4 m<sup>3</sup>/s. Questo valore può essere garantito in parte dal Naviglio della Martesana, da cui è possibile derivare una portata di 3.3 m<sup>3</sup>/s, corrispondente alla portata residua ottenibile dal bilancio idrologico effettuato sul Naviglio della Martesana, tenendo conto delle portate di concessione (32 m<sup>3</sup>/s in estate), della somma delle sottoscrizioni irrigue (circa 25 m<sup>3</sup>/s), di una stima delle perdite idrologiche per infiltrazione (circa 2.5-3 m<sup>3</sup>/s) e del fatto che tale Naviglio può ricevere un ulteriore sussidio idrico dal Canale Villoresi.

La portata residua del Naviglio della Martesana in via Melchiorre Gioia, inoltre, viene attualmente incrementata di 0.7 m<sup>3</sup>/s (dato stimato dal Consorzio di Bonifica Est Ticino Villoresi) dagli scarichi degli impianti a pompe di calore ubicate in zona Porta Nuova. Si tratta di acqua di ottima qualità dal punto di vista dei requisiti della Cerchia interna, che può essere aggiunta a quella derivata dalla Martesana, portando a 4 m<sup>3</sup>/s la portata ottenibile nel Naviglio riaperto.

L'interruzione della continuità idraulica tra la Martesana, naturale alimentatore della Fossa Interna, e la Darsena ha però sostanzialmente azzerato l'alimentazione della roggia Vettabbia, che dall'epoca romana irriga quasi 5000 ettari nel territorio compreso

tra Milano e Melegnano. Alla fine degli anni '90 il suo ramo di valle è stato rialimentato da acque provenienti dal depuratore di Nosedo, ovvero acque di fognatura depurate in forma molto spinta, che rispettano limiti molto restrittivi e che ne consentono il riuso irriguo. Nella parte settentrionale, il ramo alto della roggia Vettabbia è stato alimentato attraverso il canale Grande Sevese (canale sotterraneo derivato dall'antico fossato delle mura romane di Massimiano) con circa 30 pozzi di prima falda. La disponibilità d'acqua nella Cerchia permetterebbe di risolvere i problemi della roggia Vettabbia e di garantirne un'alimentazione costante, derivando in essa parte della portata della Cerchia. Per mantenere condizioni di velocità minima accettabile nel tratto terminale della Cerchia (dalla derivazione della roggia Vettabbia alla conca di Viarenna), tale portata non dovrebbe essere superiore a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tenendo conto pertanto di derivare in Vettabbia una portata pari a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , la portata residua scaricata dalla Cerchia interna nella Darsena risulterebbe pari a  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Una piccola frazione della portata così definita potrebbe essere infine utilizzata sia per potenziali usi irrigui per le aree verdi dei Giardini Pubblici e dei Giardini della Guastalla, sia per alimentare la roggia Balossa nei Giardini Pubblici, oggi alimentata con acqua proveniente dall'acquedotto municipale.

#### 4.1.4 | LA NAVIGAZIONE LUNGO LA CERCHIA

Lo studio di fattibilità ha come obiettivo la valutazione della possibilità di riattivazione funzionale del Naviglio della Martesana e della Cerchia interna. Tra le funzioni principali, i vincoli maggiori sono posti dalla riattivazione del canale come via d'acqua navigabile, anche se a fini unicamente turistici e non commerciali come in passato.

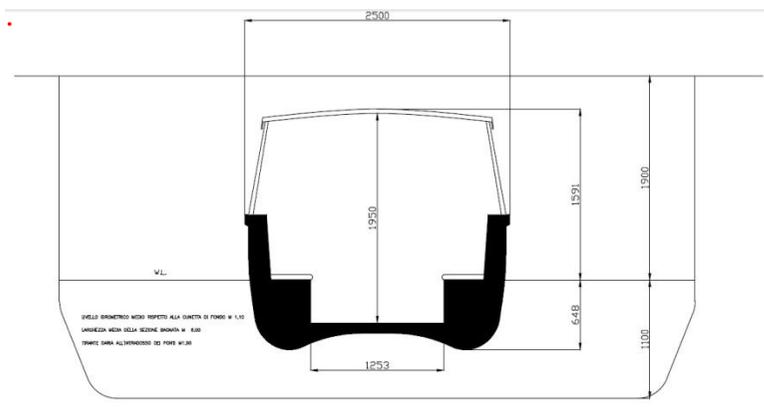
La possibilità di riattivare il Naviglio come canale navigabile presuppone:

- la possibilità di realizzare un'imbarcazione in grado di soddisfare i requisiti stringenti imposti dalla peculiarità del progetto;
- il rispetto dei vincoli necessari alla navigazione in tutte le sezioni del canale;
- la valutazione preliminare dei tempi necessari per la navigazione e per il passaggio delle conche di navigazione ("concate").

##### 4.1.4.1 Tipologia di imbarcazione

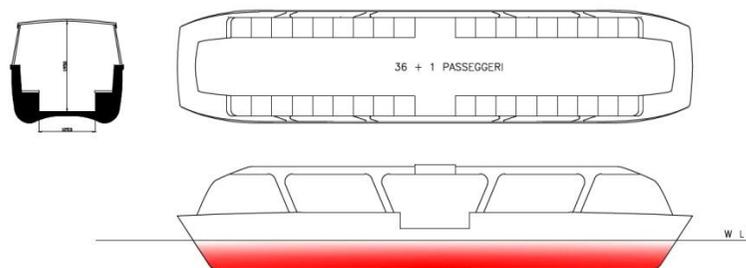
La determinazione della tipologia d'imbarcazione che appare più consona alle necessità di una navigazione di tipo turistico su un canale con pescaggio ridotto e bassa luce di passaggio sotto i ponti può essere basata sulle seguenti considerazioni:

- il tirante d'aria minimo sotto i ponti fissato di 1.90 m permette un'altezza fuori acqua - in terminologia nautica *opera morta* - di 1.60 m in sicurezza;
- il tirante minimo di 1.10 m fissato permette una profondità in acqua, pescaggio o in terminologia nautica *opera viva*, di circa 60 cm;
- la dimensione verticale minima interna per il passaggio dei passeggeri è di 1.96 m di passaggio; a questi si aggiungono 10 cm di spessore della struttura della barca sul fondo e lo spessore della copertura trasparente. Il valore complessivo di 2.10 m, permette di realizzare l'imbarcazione rispettando tutti i vincoli preposti.



**FIG. 4.1.4.1.1**

Sezione di riferimento per una possibile imbarcazione passeggeri di tipo turistico in servizio lungo la Cerchia del Naviglio.



**FIG. 4.1.4.1.2**

Tipologia di imbarcazione per la navigazione lungo la Cerchia del Naviglio con sezione, pianta e vista laterale.

Le dimensioni ipotizzate per l'imbarcazione risultano le seguenti:

- larghezza pari a 2.5 m;
- lunghezza pari a 11.3 m per la necessità di mantenere le proporzioni con la larghezza ridotta e presenta la carena a forma di gabbiano;
- per garantire i 60 cm richiesti di immersione, l'idea è quella di appesantire lo scafo dotandolo delle batterie necessarie ad una propulsione totalmente elettrica con elevata autonomia. Il peso elevato delle batterie costituirebbe la zavorra necessaria per garantire l'immersione.
- la barca è anfidroma (bidirezionale) e la postazione di pilotaggio può essere installata a ciascuna estremità; l'imbarco dei passeggeri è previsto in posizione centrale, con una tuga amovibile;
- si propone di limitare, se possibile, gli incroci tra due barche ai tratti di larghezza maggiore ai 6 m.

Per quanto riguarda la disposizione interna dell'imbarcazione si propone di disporre i sedili allineati lungo i fianchi, rivolti lateralmente. Ne conseguono due vantaggi non trascurabili: la larghezza del corridoio centrale è triplicata (consentendo di avere il pilota in posizione centrale e lasciando uno spazio centrale ad eventuali guide turistiche) e i passeggeri hanno una visuale molto più ampia verso i lati, potendo guardare direttamente verso la sponda più lontana e riducendo drasticamente l'effetto di "affossamento" della navigazione a quota inferiore al piano strada.

Per quanto riguarda la carena, si propone una carena tipo catamarano ribassato o, meglio, ad ali di gabbiano: garantisce grande stabilità al rollio e consente di ottenere tutte le caratteristiche richieste dal progetto.

#### 4.1.4.2 Rispetto dei vincoli per la navigabilità

Si è già verificato come i valori di portata adottati risultino idonei al buon funzionamento del Naviglio in termini di rispetto delle condizioni igieniche, garantendo valori di velocità media della corrente sufficientemente elevati (maggiori di 0.2 m/s) da impedire deposito di sedimenti, sviluppo di vegetazione e insetti; nel contempo, tali valori risultano ovunque abbastanza bassi (non superiori a 0.7 m/s) da garantire la manovrabilità dei natanti (Figura 4.1.2.1, fascia compresa tra le linee verdi tratteggiate).

Nel dettaglio si può notare che i valori massimi di velocità risultano lungo tutto il tratto del canale riaperto inferiori al limite prefissato; per quanto riguarda invece le velocità minime, le sezioni in cui i valori di velocità minime si riducono al di sotto del valore di 0.2 m/s risultano ubicate unicamente in prossimità del Laghetto di San Marco ed, eventualmente, in corrispondenza del laghetto a monte della Conca di Viarenna, qualora dovesse essere preferita l'ipotesi di suo ripristino integrale.

Come discusso al paragrafo 4.1.2, i vincoli per la navigabilità imposti per determinare la portata di progetto sono che il tirante d'acqua risulti abbastanza elevato da garantire il pescaggio dei natanti (tiranti d'acqua superiori a 1.1 m) e che la luce tra la superficie libera e l'intradosso dei ponti consenta il passaggio delle imbarcazioni (tiranti d'aria superiori a 1.9 m).

Dalle simulazioni effettuate sul modello idraulico della Cerchia, le variazioni dei tiranti nelle varie sezioni risultano dappertutto superiori al limite di 1.1 m, richiesto per garantire la navigazione (Figura 4.1.4.2.1, linea verde tratteggiata). Solo in corrispondenza della Conca di via Pirelli, tale valore raggiunge un valore minimo pari a 1.05 m: tale valore, seppur con tolleranza minima, risulta il

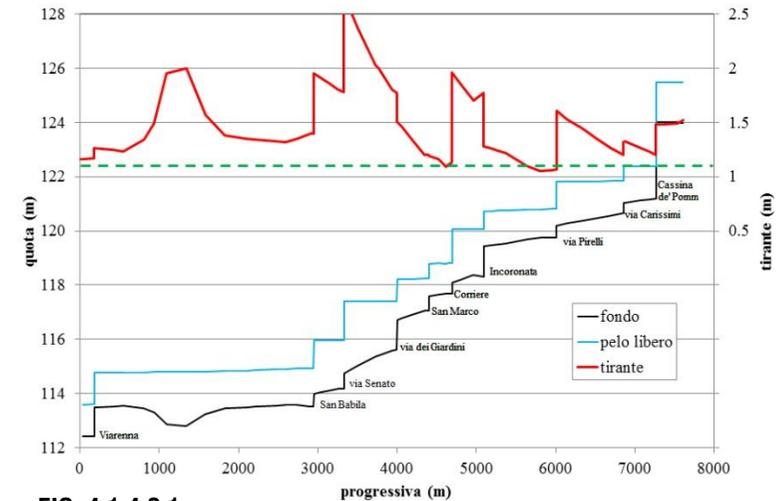


FIG. 4.1.4.2.1

Andamento dei tiranti idrici lungo il tratto terminale del Naviglio della Martesana e la Cerchia interna.

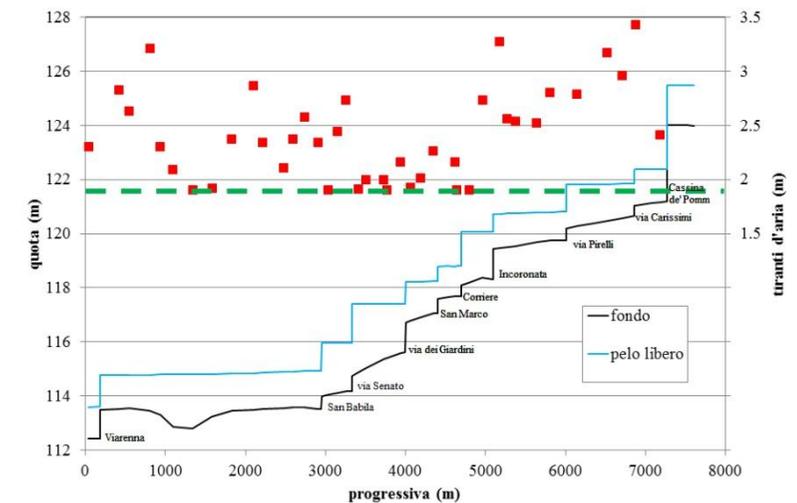


FIG. 4.1.4.2.2

Andamento dei tiranti d'aria sotto i ponti del tratto terminale del Naviglio della Martesana e della Cerchia interna.

migliore compromesso ottenibile dal vincolo indotto dalla quota del pelo libero in corrispondenza dell'Incoronata, fissata dalla tipologia del manufatto storico, e dal valore della quota di fondo alveo in Via Pirelli, determinata dalla presenza del mezzanino della stazione della metropolitana MM2 Gioia. In tali sezioni il tirante risulta in ogni caso superiore ad 1 m, il che non dovrebbe porre problemi alla navigazione di imbarcazioni con un pescaggio massimo di 0.6 m (vedi paragrafo 4.1.4.1).

Per quanto riguarda il tirante d'aria sotto i ponti, solo un'attenta valutazione congiunta degli aspetti idraulici, urbanistici e viabilistici ha permesso di trovare una configurazione che permettesse di rispettare il vincolo imposto dal pur esiguo valore di 1.9 m.

Per alcuni ponti il tirante d'aria risulta comunque pari al valore limi, come visibile in figura 4.1.4.2.2. Le sezioni corrispondenti ai punti più critici risultano essere le seguenti:

- ponte di Via Moscovia;
- ponte del Corriere;
- ponte di Porta Nuova a Piazza Cavour;
- ponte di via Sant'Andrea;
- ponte di Corso Monforte;
- ponte di Corso Italia.

Ai fini di una fruibilità estetico-paesaggistica del Naviglio, risulta necessario mantenere il più possibile vicina alle sponde la superficie dell'acqua, limitando il più possibile la distanza verticale fra di esse (franco). Dato che la posizione della superficie libera in ogni sezione è determinata da valle dalla regolazione alle conche di navigazione, a sua volta legata ai vincoli di rispetto dei tiranti d'aria nei ponti con quota di intradosso minima, i margini di intervento sulla riduzione del franco sono risultati esigui. L'unico intervento che si è potuto predisporre è stato quello di inserire nuove conche

di navigazione per elevare, ove possibile, la quota della superficie d'acqua. Ciò è stato effettuato, in particolare, con l'introduzione:

- della conca del Corriere, riducendo il franco in corrispondenza del tratto di via San Marco compreso tra via Moscovia e via Castelfidardo;
- della conca di San Babila, riducendo il franco in via San Damiano.

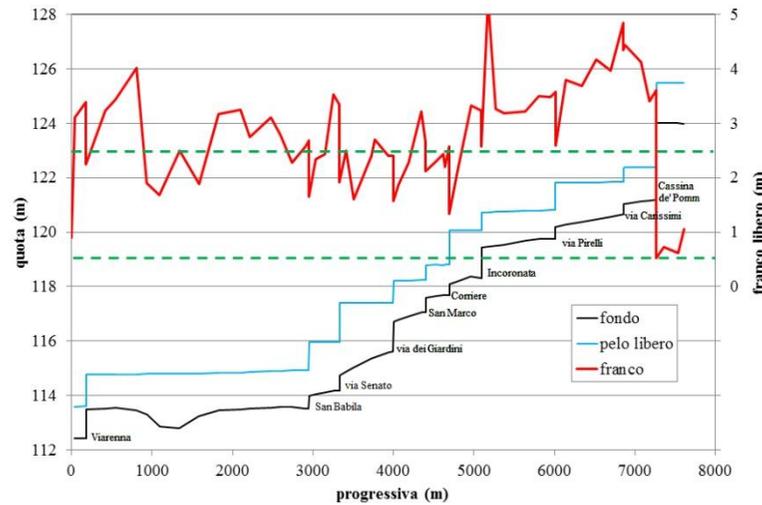
In figura 4.1.4.2.3 si può vedere che, pur con questi accorgimenti, il franco mantiene un valore elevato (superiore a 2.5 m) in tre tratti:

- in via Melchiorre Gioia, dove però il problema è risolto dalla presenza dell'alzaia sinistra ribassata o dal tratto in galleria;
- in via Francesco Sforza, a monte del ponte di porta Romana;
- in via Molino delle Armi e via De Amicis, a monte e a valle del ponte di Porta Ticinese.

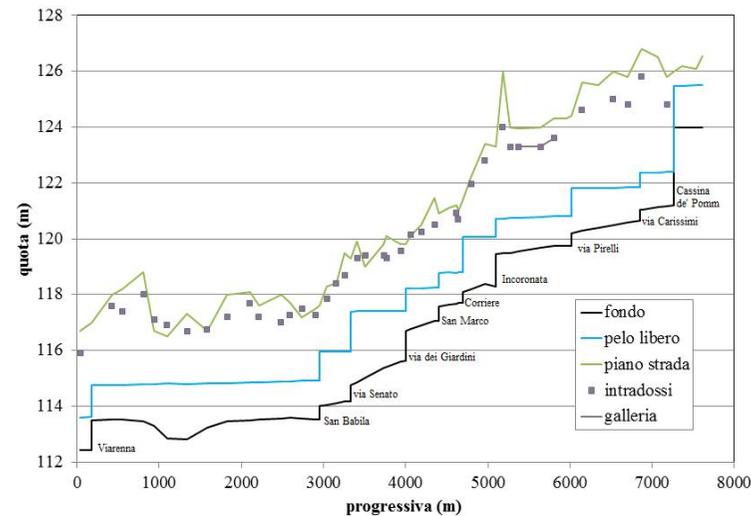
In questi ultimi due tratti il problema è dovuto alla quota elevata del piano strada in corrispondenza alle porte medievali e non è risolvibile (figura 4.1.4.2.4).

**FIG. 4.1.4.2.3**

Andamento del franco libero lungo il tratto terminale del Naviglio della Martesana e la Cerchia interna.

**FIG. 4.1.4.2.4**

Localizzazione del piano strada e degli intradossi lungo il tratto terminale del Naviglio della Martesana e la Cerchia interna.



### 4.1.4.3 Tempi di navigazione

I risultati del modello idraulico permettono di stimare con buona approssimazione i tempi necessari alla navigazione lungo il tratto ripristinato di Naviglio della Martesana e di Cerchia interna.

Il calcolo richiede, preliminarmente, la stima, per ogni conca di navigazione, del tempo di concata, ovvero del tempo complessivo necessario al riempimento della conca. Nello specifico, tale grandezza corrisponde all'intervallo di tempo che intercorre tra l'ingresso e l'uscita di una imbarcazione dalla conca stessa. Tale arco temporale pertanto è dipendente innanzitutto dai tempi di manovra per le operazioni di ingresso, attracco e uscita dai bacini di regolazione (che si possono considerare uguali per ogni conca) e in secondo luogo dai tempi di riempimento (che invece sono una caratteristica della geometria dei manufatti, dei livelli di monte e di valle e della tipologia di impianto di adduzione dell'acqua)

Per calcolare i tempi di concata pertanto per il Naviglio riaperto si è fatto riferimento alle seguenti specifiche:

- si è considerato un tempo di 4 minuti per la manovra di ingresso, attracco e uscita da ogni conca;
- si sono considerate le dimensioni geometriche di ogni conca, in generale pari a sono sui 22.5 m di lunghezza per 4.5 m di larghezza, tranne che per le due conche esistenti (Incoronata e Viarena), di cui si è considerata la geometria reale, e per la conca di via Senato, di cui si è ipotizzato un parziale recupero delle strutture storiche;
- si sono considerati due sistemi di alimentazione per la concata, in corrispondenza alle porte di monte e di valle, consistenti in una tubazione di diametro 500 mm e lunghezza 8 m (inserita nell'alzaia), dotati di valvola automatica di regolazione;

- si sono considerati tempi di apertura della valvola di regolazione tali da non avere mai, all'interno della conca, velocità verticali di risalita dell'acqua superiori a 1 cm/s.

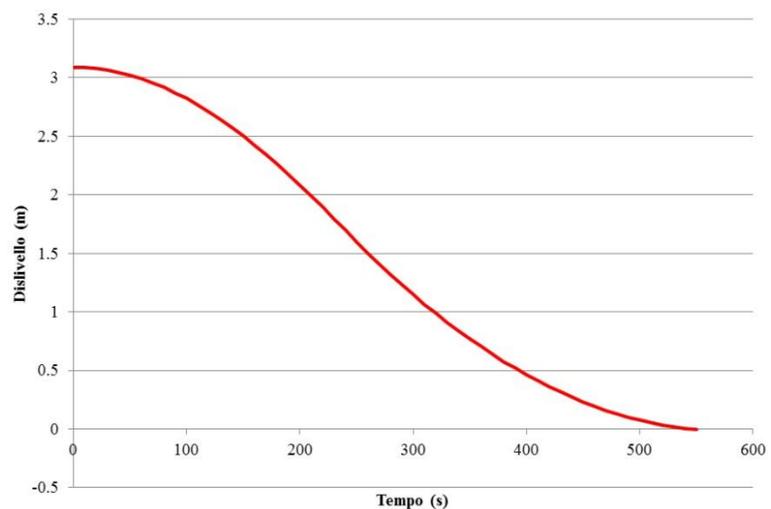
Per ogni conca deve essere inoltre previsto, ai fini della conduzione idraulica del sistema ad acqua fluente, un canale di soccorso, che può anche essere coperto; nel caso della conca dell'Incoronata si può pensare di recuperare sfruttare il canale coperto ancora esistente che passa dietro la scuola.

Il calcolo del transitorio di riempimento dipende, oltre che dalla geometria della conca e dell'impianto, dal dislivello dei peli liberi tra monte e valle, determinando tempi anche molto diversi tra le diverse conche.

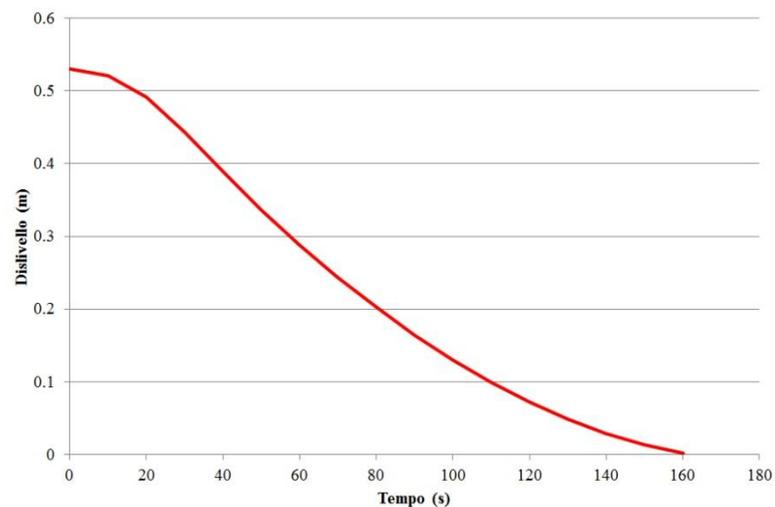
A titolo di esempio, si riporta il dettaglio del transitorio relativo alla conca con il dislivello maggiore (Cassina de' Pomm, 3.09 m, figura 4.1.4.3.1) e ad una con basso dislivello (San Marco, 0.53 m, figura 4.1.4.3.2).

Il calcolo dei tempi di navigazione può essere quindi completato ipotizzando una velocità costante di navigazione, pari a 4 nodi, nei tratti compresi tra due successive conche di navigazione.

La tabella seguente riassume la stima ottenuta per i tempi di navigazione lungo il tratto terminale del Naviglio della Martesana e la Cerchia interna.



**FIG. 4.1.4.3.1**  
Transitorio di riempimento della conca di navigazione di Cassina de' Pomm.



**FIG. 4.1.4.3.2**  
Transitorio di riempimento della conca di navigazione di San Marco.

Tratto	Conca	Discesa (min)	Salita (min)
Cassina de' Pomm – via Edolo		3	4
	Cassina de' Pomm	13	13
via Edolo – via Carissimi		3	4
	via Carissimi	7	7
via Carissimi – M2 Gioia		6	9
	via Pirelli	8	8
M2 Gioia – Tombon de San Marc		6	8
	Incoronata	10	10
Incoronata – Corriere		3	5
	Corriere	9	9
Corriere – San Marco		2	3
	San Marco	7	7
San Marco – via dei Giardni		3	4
	via dei Giardini	8	8
via dei Giardini – via Senato		5	7
	via Senato	10	10
corso Venezia – via Mascagni		3	4
	San Babila	8	8
via Mascagni – Porta Romana		7	12
P.ta Romana – P.ta Ticinese		7	11
Porta Ticinese – Viarenna		4	6
	Viarenna	10	10
Viarenna - Darsena		2	2

In sintesi, dalla lettura dei dati riportati in tabella, si deduce che:

- i tempi di concata sono compresi tra i 7 e i 10 minuti, tranne che per Cassina de' Pomm, che ha un dislivello più alto e richiede 13 minuti;
- tempi di navigazione complessivi da Cassina de' Pomm a Viarenna sono 2 ore 20 minuti in discesa e 2 ore 40 minuti in salita. Tali valori sembrano molto elevati, ma si deve considerare che il servizio è di tipo turistico e fruibile a tratte più brevi;
- per dare un'idea dei tempi di tratti intermedi con valenza turistica:
  - a) Porta Nuova - Laghetto di San Marco (Brera): in discesa 24 minuti, in salita 35 minuti; passaggio di 2 conche di navigazione;
  - b) San Marco - Ca' Granda: in discesa 43 minuti, in salita 52 minuti; passaggio di 3 conche di navigazione;
  - c) via Senato - Basilica di San Lorenzo: in discesa 35 minuti, in salita 45 minuti; passaggio di 2 conche di navigazione.

## 4.1.5 | VALUTAZIONI SULLA PRODUCIBILITÀ IDROELETTRICA

La possibilità di produrre energia elettrica sfruttando i salti idraulici in corrispondenza delle conche di navigazione è in conflitto con l'introduzione di conche in numero superiore rispetto a quelle storiche, in quanto i salti idraulici ne risultano aumentati in numero e ridotti in entità.

In alcuni casi, il salto idraulico (dislivello tra i peli liberi di monte e di valle) risulta di entità così bassa (inferiore a 1.00 m) da non essere utilizzabile per uno sfruttamento idroelettrico. È questo il caso delle conche di via Carissimi, di San Marco e di via dei Giardini; anche nel caso della conca dell'Incoronata (dove comunque l'introduzione di una turbina idroelettrica nel manufatto storico sarebbe problematica), la presenza a valle della conca del Corriere limita il salto idraulico a valori troppo bassi.

Le altre conche risultano avere salti compresi tra 1 e 2 m, con l'unica eccezione della conca di Cassina de' Pomm, che risulta essere di gran lunga quella con le caratteristiche più promettenti dal punto di vista energetico.

Nella tabella seguente sono riassunte le caratteristiche dei salti idraulici in corrispondenza delle conche, con stima della potenza  $W$  e della producibilità elettrica annuale  $E$  ottenibili ipotizzando un impianto con rendimento complessivo pari a 0.7 e un funzionamento per 300 giorni/anno.

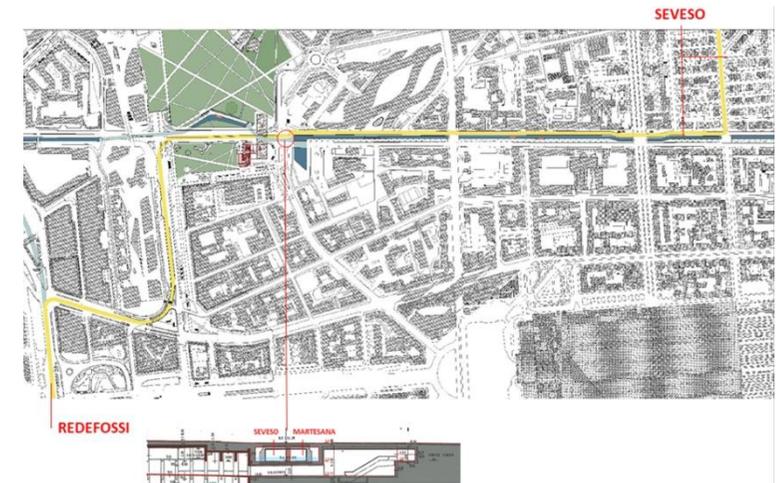
Conca	Salto idraulico (m)	Portata (m <sup>3</sup> /s)	$W$ (kW)	$E$ (MWh)
Cassina de' Pomm	3.09	3.3	70	504
Via Carissimi	0.51	3.3	-	-
via Pirelli	1.00	3.6	24.4	176
Incoronata	0.66	4.0	-	-
Corriere	1.24	4.0	34	245
San Marco	0.53	4.0	-	-
via dei Giardini	0.82	4.0	-	-
via Senato	1.43	4.0	39.2	283
San Babila	1.03	4.0	28.3	204
Viarenna	1.15	3.0	23.7	170

La producibilità elettrica complessiva dei 6 impianti realizzabili lungo il tratto di Naviglio riattivato risulta pari a circa 1.6 GWh/anno.

## 4.1.6 | DISCONNESSIONE IDRAULICA DEL TORRENTE SEVESO DAL NAVIGLIO DELLA MARTESANA

La necessità di mantenere acqua di buona qualità in ingresso a Milano e di sgravare il cavo Redefossi, nella sua funzione di scaricatore del torrente Seveso, ha portato ad una proposta di disconnessione idraulica del torrente Seveso dalla Martesana, andando ad operare tale disconnessione idraulica senza compromettere le già carenti caratteristiche idrauliche del Seveso durante i suoi eventi di piena.

In prima ipotesi, tale disconnessione consiste nella creazione di due canali paralleli in via Melchiorre Gioia: uno, coperto, dimensionato in modo da garantire lo smaltimento delle portate di piena del Seveso compatibili con le caratteristiche del cavo Redefossi a valle; l'altro, aperto, per ripristinare il percorso storico del Naviglio Martesana. Tale ipotesi, come visibile dal tracciato planimetrico riportato in figura 4.1.6.1, prevede che il suddetto canale sottopassi il Naviglio della Martesana andando a confluire nel Redefossi. Questa tipologia di configurazione tuttavia implica la necessità di far fronte a problemi costruttivo-esecutivi, legati, da una parte, alla realizzazione del nuovo manufatto scaricatore in Redefossi che, alla luce della morfologia progettuale proposta, dovrebbe prevedere un angolo di curvatura molto stretto; dall'altra, alla necessità di un lungo tratto in galleria del Naviglio della Martesana a Porta Nuova.



**FIG. 4.1.6.1**

Tracciato e sezione del canale di disconnessione del torrente Seveso in via Melchiorre Gioia, via Liberazione e via Galilei.

La soluzione proposta, tenendo conto che i due canali devono scorrere affiancati al di sopra del mezzanino della stazione metropolitana M2 Gioia, consiste nella:

- realizzazione di un nuovo canale coperto per il torrente Seveso lungo le vie Melchiorre Gioia, viale Liberazione e via Galilei, dimensionato per una portata di 30 m<sup>3</sup>/s;
- costruzione di uno scivolo per realizzare in corrente veloce il sottopassaggio del Naviglio della Martesana a valle della stazione M2 Gioia;
- nuova confluenza del torrente Seveso nel cavo Redefossi all'incrocio tra via Galileo e viale Monte Santo.

Il dimensionamento preliminare del canale è stato effettuato in condizioni di moto permanente, ipotizzando un canale rettangolare a fondo ribassato, coperto, in calcestruzzo con pendenza dell'1‰. Si è verificato che, in queste condizioni, il canale necessita di una larghezza di 6.5 m per convogliare la portata di progetto.

La fattibilità del canale proposto è stata quindi verificata realizzandone un modello idraulico (sempre con il software Hec-Ras), in modo da valutare il dimensionamento più adatto e verificare la compatibilità dei parametri idraulici del nuovo canale che convoglierà le acque del Seveso nel cavo Redefossi. Le fasi affrontate nella stesura del modello idraulico sono le seguenti:

- verifica della sostenibilità in condizioni di piena del Seveso (30 m<sup>3</sup>/s);
- verifica della realizzabilità del sottopasso del Naviglio della Martesana in condizioni di corrente veloce;
- ricostruzione di un profilo attendibile nel cavo Redefossi, per valutare l'effetto di rigurgito sul canale del Seveso.

La geometria definitiva proposta per il canale coperto al termine della fase di verifica con il modello idraulico prevede:

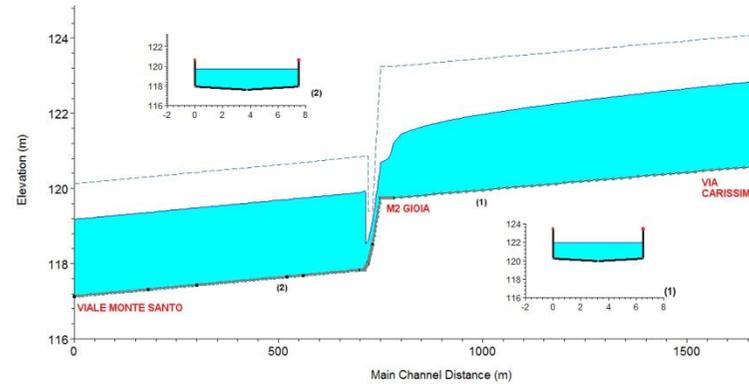
- un primo tratto, tra via Carissimi e la stazione M2 Gioia, di larghezza pari a 6.5 m, altezza pari a 3.5 m e pendenza costante dell'1‰;
- un raccordo di lunghezza pari a 20 m, altezza pari a 3.5 m e pendenza nulla, in cui la larghezza del canale passa da 6.5 a 7.5 m;
- uno scivolo opportunamente sagomato, di lunghezza pari a 40 m, in cui la quota del fondo passa da 119.75 a 117.84 m s.l.m.;
- un secondo tratto, a valle dello scivolo fino alla confluenza nel cavo Redefossi, di larghezza pari a 7.5 m, altezza pari a 3 m e pendenza costante dell'1‰; l'aumento della larghezza del canale è introdotto per limitare il tirante nel tratto di valle e, conseguentemente, il rischio di rigurgito dello scivolo di sottopassaggio.

Il profilo altimetrico e idraulico del canale ipotizzato è rappresentato in figura 4.1.6.2.

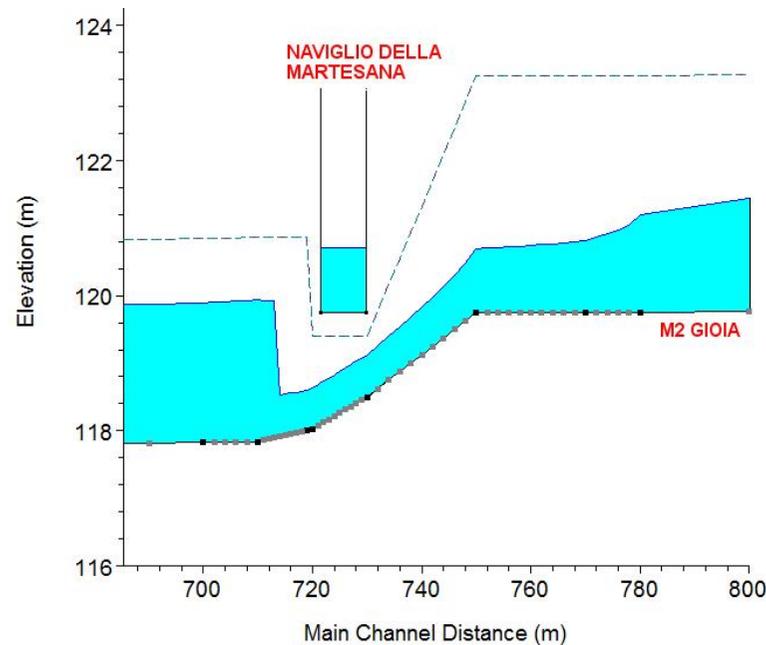
Il punto idraulicamente più delicato in tale configurazione risulta lo scivolo di sottopassaggio della Martesana, che dovrà convogliare una portata di piena pari a 30 m<sup>3</sup>/s senza rischio di rigurgiti verso monte. Questo scivolo dovrà avere una pendenza elevata in modo tale da portare la corrente del Seveso in condizioni di corrente veloce ed ottenere, di conseguenza, l'abbassamento del tirante. Il profilo di corrente veloce che si instaura permette di avere comunque un franco minimo di 0.4 m lungo lo scivolo. A valle dello stesso infine si andrà a generare un risalto idraulico, attraverso cui la corrente si riporterà nelle condizioni di corrente lenta determinate dalla pendenza e dal livello imposto a valle (Figura 4.1.6.3).

**FIG. 4.1.6.2**

Profilo altimetrico e idraulico del canale del torrente Seveso da via Carissimi alla confluenza nel cavo Redefossi.

**FIG. 4.1.6.3**

Dettaglio del profilo di corrente lungo lo scivolo di sottopassaggio della Martesana.



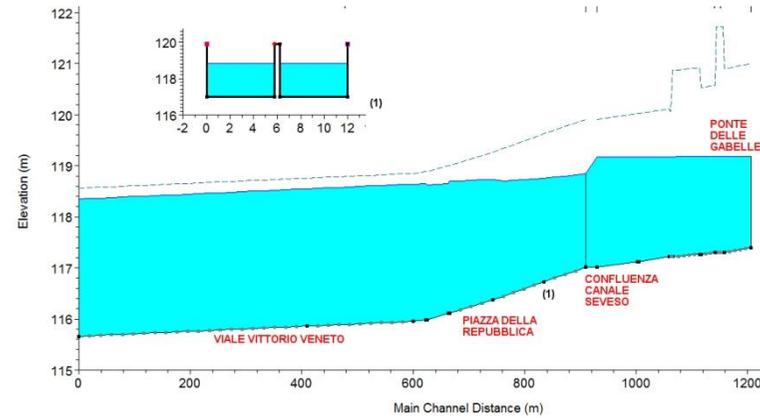
La geometria riassunta nella tabella sottostante permette di realizzare uno scivolo a sezione rettangolare in cui la corrente, per la portata di progetto, mantiene un franco di sicurezza sufficiente rispetto alla copertura del canale.

Progressiva (m)	Larghezza (m)	Quota fondo (m s.l.m.)	Quota copertura (m s.l.m.)
0	6.5	119.75	123.25
20	7.5	119.75	123.25
40	7.5	118.50	119.40
50	7.5	118.03	119.40
51	7.5	118.00	120.86
60	7.5	117.84	120.86

Risulta comunque necessario, ai fini della sicurezza idraulica, prevedere in fase progettuale uno scaricatore di sicurezza delle acque del Seveso nel Naviglio della Martesana: qualora il manufatto di sottopassaggio dovesse infatti andare in pressione, questo eviterebbe il rischio di rigurgito verso monte con conseguente possibile esondazione in Via Melchiorre Gioia. Le portate in eccesso scaricate in Martesana verrebbero successivamente reimmesse in Redefossi attraverso lo scaricatore esistente al Ponte delle Gabelle, di cui si prevede comunque il mantenimento con funzioni di scaricatore del Naviglio della Martesana.

Per quanto riguarda la modellazione del cavo Redefossi ai fini della valutazione del livello nel cavo sul rigurgito da valle nel canale del Seveso, si è proceduto ad una ricostruzione di massima di tutto il tratto compreso tra l'incile al Ponte delle Gabelle fino a metà di Viale Vittorio Veneto, utilizzando alcune planimetrie e sezioni fornite dall'ufficio tecnico di Metropolitana Milanese. Nel tratto a sezione quadrangolare doppia a valle di viale Monte Santo (e della confluenza del progettato canale del Seveso), si è scelto di considerare una scabrezza maggiore nel canale destro, ossia quello

più vicino alla scarpata dei Bastioni, rispetto al canale sinistro (coefficiente di scabrezza di Strickler  $k_s = 33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  per il canale destro;  $k_s = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  per il canale sinistro). Le simulazioni idrauliche mostrano che un valore di portata di piena di  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , a cui sono stati aggiunti indicativamente  $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$  provenienti dai vari scaricatori di piena che confluiscono nel cavo Redefossi, porta al quasi completo riempimento della sezione del canale (Figura 4.1.6.4); l'elevato tirante che ne risulta in viale Vittorio Veneto, tuttavia, non influisce sul rigurgito nel canale del Seveso.



**FIG. 4.1.6.4**

Profilo altimetrico e idraulico del tratto del cavo Redefossi compreso tra l'incile e viale Vittorio Veneto per una portata di  $35.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 4.2 IPOTESI PRELIMINARE DI FATTIBILITÀ GEOLOGICA ED IDROGEOLOGICA

Guido Rosti e Marco Proverbio

### 4.2.1 | SOMMARIO

Il presente studio preliminare intende iniziare ad approfondire le caratteristiche e la configurazione della struttura geologica ed idrogeologica nel cui contesto si sviluppa il “Sistema dei Navigli” esistente e quello un tempo interrato che oggi si vorrebbe riportare alla luce.

In particolare si vuole verificare con la massima sicurezza possibile se le azioni che si vogliono intraprendere (riapertura della Cerchia interna, riattivazione della navigazione dei canali esistenti e delle conche di navigazione, differente gestione idraulica delle acque, etc.) possano avere effetti particolari in interconnessione con l'idrogeologia presente ed in particolare con la tavola d'acqua rappresentata dalla superficie piezometrica.

Oltre a riportare in un quadro sintetico e accessibile la struttura geologica ed idrogeologica, lo sviluppo di tale fase preliminare di studio ha consentito sin d'ora, già con i dati al momento disponibili, di accertare con una buona approssimazione che non sembrano manifestarsi particolari situazioni di rischio, ma ha tuttavia posto l'accento sul fatto che sarebbe estremamente importante evitare qualsiasi perdita di acque verso falda, soprattutto nell'areale urbano, per impedire un incremento indesiderato del grave fenomeno di innalzamento freatico verificatosi a far tempo dal 1990 connesso alla dismissione industriale verificatasi.

### 4.2.2 | INTRODUZIONE

Nell'ottica di una corretta politica di vero sviluppo sostenibile, qualsiasi azione che si progetta di realizzare deve tenere attentamente conto di tutti gli aspetti ambientali, fisici e di contorno che potrebbero subire alterazioni ed effetti di differente peso, a causa dell'azione che si vuole realizzare. Vanno quindi attentamente soppesate le cause e gli effetti ad essi connessi. Uno dei principali aspetti da analizzare approfonditamente quando si affronta la tematica della riattivazione della funzionalità del sistema Navigli nel suo complesso, oltre a quello urbanistico, viabilistico ed ovviamente idraulico è sicuramente anche quello che affronta le tematiche di carattere geologico ed idrogeologico del territorio milanese all'interno del quale il sistema si sviluppa cui, come vedremo, è intimamente legato.

Le caratteristiche geolitologiche dei terreni attraversati, il grado di permeabilità, la situazione idrogeologica presente, le caratteristiche della tavola d'acqua e le sue interconnessioni con la struttura idraulica del sistema, sono tutti fattori da soppesare con estrema attenzione per garantire che qualsiasi intervento venga sviluppato con occhio attento, non solo alle condizioni in essere, ma anche e soprattutto a quelle che potrebbero svilupparsi in futuro (oscillazioni della falda, portate fluviali e previsione di tempi di ritorno delle piene, apporti all'agricoltura, etc.).

A tale proposito è emblematico l'esempio che ci viene offerto dall'innalzamento brusco e repentino dei livelli freatici che si è verificato nel milanese a cominciare dai primi anni novanta del ventesimo secolo. Il brusco arresto dell'attività di numerosissimi siti produttivi grandi e piccoli e di interi poli industriali che circondavano la città e che si configuravano quali grossissimi consumatori d'acqua, (con un prelievo di falda che era stimabile nell'ordine dei 40/45 milioni di mc/anno, circa 140.000

mc/giorno<sup>2</sup>), ha provocato una fortissima risposta della falda con innalzamenti in pochi anni, anche di 7/8 metri in città. Il fenomeno che si è protratto, anche se con minore intensità, nei primi anni del ventunesimo secolo e che è presente tuttora, ha così provocato ingenti danni nelle strutture sotterranee (box, scantinati, metropolitana, ospedali, etc.) costringendo a tamponare la situazione con pompaggi volanti, costosi da un lato, ma anche estremamente dannosi per il sistema di depurazione milanese, per la necessaria immissione di parte delle acque emunte “pulite” nel sistema fognario, con un indesiderato effetto di forte diluizione e di aumento ingiustificato dei volumi da trattare. Sarebbe bastato ricordarsi della storia idrogeologica passata per prevedere possibili oscillazioni anche di tale portata e realizzare opere sotterranee adeguate e compatibili con tale possibile vivacità freatica.

Tutto ciò pertanto ci suggerisce di agire sempre con la massima attenzione ai fenomeni naturali presenti ed alle loro eventuali variazioni, in presenza di qualsiasi tipo di intervento che possa in qualche modo interagire con le loro dinamiche e quindi in particolare l'ipotesi di riattivazione del grande ed articolato sistema dei Navigli, come in origine era stato pensato perché proprio questo è l'ambizioso obiettivo di lungo periodo che ci vogliamo porre: ricreare alla fine quel sistema navigabile in parte distrutto, ma in parte ancora perfettamente funzionante, così da ricollegare attraverso la Città di Milano i laghi Maggiore e di Como fino al Ticino e quindi ai sistemi di navigazione fluviali del Po. Nel presente studio pertanto, che individua come orizzonte territoriale quello compreso tra i fiumi Adda e Ticino, in pratica il territorio della Provincia di Milano, con una specifica focalizzazione sulla città di Milano, si cercherà quindi di chiarire tali dinamiche e le interconnessioni che ne potrebbero derivare analizzando le

strutture geologiche esistenti e proponendo eventuali soluzioni di sostenibilità adeguata.

---

<sup>2</sup> Valutazioni sull'innalzamento della falda nella città di Milano nei primi anni '90– Provincia di Milano– Ottobre 1996

### 4.2.3 | GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

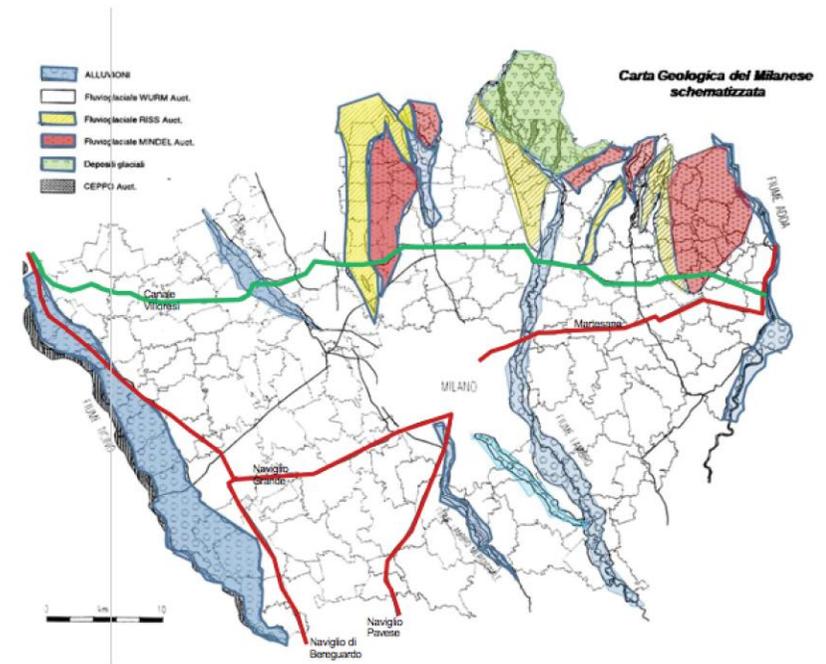
La geologia di quest'area presenta unità prevalentemente legate all'ambiente di deposizione glaciale, fluvio-glaciale e localmente lacustre. In pratica ci si trova di fronte ad un potente strato di ghiaie, sabbie ed argille di uno spessore di centinaia di metri che da un lato protegge l'area da fenomeni sismici, ammortizzandone gli effetti e dall'altro crea una condizione estremamente fortunata per la creazione di falde idriche a varia profondità con quantitativi d'acque estremamente rilevanti.

Sono state rilevate diverse unità, correlabili in funzione dei litotipi e delle caratteristiche sedimentologiche, alle vecchie unità del Villafranchiano, del Mindel, del Riss e del Würm (le tre glaciazioni più recenti verificatesi nel Quaternario).

L'unico periodo ufficialmente datato è l'ultimo, il Würm, che ha avuto inizio tra 15.000 e 14.000 anni fa e collocato quindi nel Pleistocene superiore; arealmente costituisce il deposito più esteso sul territorio in studio.

L'area inoltre è stata caratterizzata da una elevata urbanizzazione nel corso dell'ultimo ventennio, che ha modificato profondamente la morfologia dei luoghi.

Di seguito si propone una descrizione delle diverse unità che compaiono nell'area di studio e della loro distribuzione sul territorio (vedi carta allegata).



**FIG. 4.2.3.1**  
Carta geologica del Milanese schematizzata

### 4.2.3.1 Inquadramento geologico e geomorfologico

Le caratteristiche geomorfologiche del territorio di Milano e nella sua Provincia risentono degli avvenimenti geologici succedutisi dal tardo Miocene fino a tutto il Quaternario e di cui le esplorazioni profonde a scopo di ricerca di idrocarburi (ad esempio da parte dell'AGIP) hanno fornito una idonea ricostruzione.

Nel Miocene superiore si produsse una forte fase erosiva su tutto l'arco prealpino con la conseguente formazione di canyons in corrispondenza degli attuali laghi prealpini, di avanzamenti e regressioni marine.

A partire dal Pliocene superiore-Pleistocene inferiore si assiste ad una fase di ritiro del mare e alla sedimentazione di depositi continentali fluvio-lacustri, deltizi e di piana costiera caratterizzati in prevalenza da granulometrie non grossolane (sabbie fini, limi, argille) per il predominare delle condizioni di acque tranquille e lagunari.

Questa unità sedimentaria, attribuita dagli AA. al Villafranchiano, è stata sottoposta ad un sollevamento dopo la sua deposizione e quindi la sua parte superiore è erosa e profondamente incisa.

Contemporaneamente alla fase di sollevamento, si sono succedute ciclicamente diverse fasi di avanzamento marino, i cui depositi hanno riempito tali incisioni e sono stati a loro volta, successivamente erosi più o meno parzialmente. Nei solchi vallivi così creati si deposero ghiaie e sabbie anche in grandi spessori, che col tempo hanno subito fenomeni di cementazione.

Con il Pleistocene l'area viene interessata da episodi glaciali, convenzionalmente raggruppati nelle tre fasi Mindel, Riss e Würm, verificatisi in successione temporale, che diedero luogo alla deposizione di una vasta coltre di sedimenti glaciali sovrapposti

nelle aree pedemontane e alluvionali ("fluvioglaciali") nella media e bassa pianura.

Alla deposizione dei sedimenti, nei periodi interglaciali fece seguito la loro erosione e questo ciclo di sedimentazione ed erosione degli episodi glaciali, ha creato un sistema di terrazzi, che attualmente occupa la porzione più alta della pianura ai piedi degli anfiteatri morenici e la media pianura. Dal Pleistocene superiore all'Olocene si è avuto il lento innalzamento dell'alta pianura testimoniato dall'affioramento in superficie dei depositi più antichi, movimento questo continuato anche in tempi più recenti.

In modo schematico il territorio si può suddividere da un punto di vista morfologico nelle seguenti zone:

#### **A. zona delle cerchie moreniche**

E' costituita dalle propaggini degli anfiteatri morenici dell'Adda e del Ticino ed occupa i territori più settentrionali ed altimetricamente più elevati. E' tipica la morfologia delle morene frontali mindeliane (sottoposte successivamente a processi d'erosione da parte delle fiumane collegate al ghiacciaio rissiano), caratterizzata da lievi ondulazioni che si intervallano ad ampie spianate.

Questi ripiani rappresentano le zone in cui si avevano ristagni d'acqua di fusione dei ghiacciai o di piccoli laghi intramorenici.

#### **B. zona dei terrazzi ferrettizzati**

L'alta pianura terrazzata rappresenta invece una seconda zona morfologica molto estesa territorialmente, dalle pendici degli archi morenici fino all'incirca all'altezza del canale Villoresi (alta e bassa Brianza). Il limite settentrionale è irregolare, adattandosi alla forma dei contorni delle morene più esterne, mentre il limite meridionale coincide grosso modo con la scomparsa dei terrazzi fluvioglaciali antichi e medi, legati all'azione delle grandi masse d'acqua delle

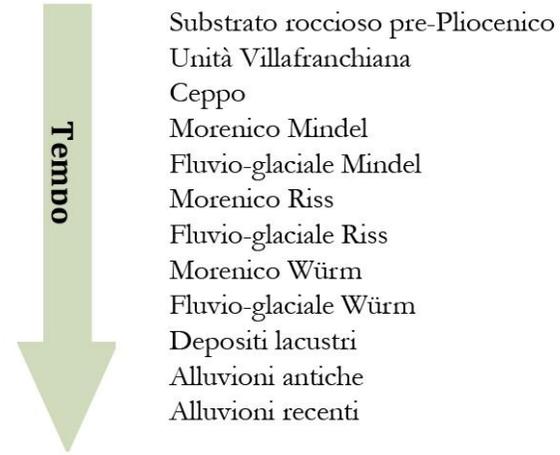
glaciazioni mindeliane e rissiane, al di sotto dei depositi fluvioglaciali recenti.

**C. zona della media e bassa pianura diluviale e alluvionale**

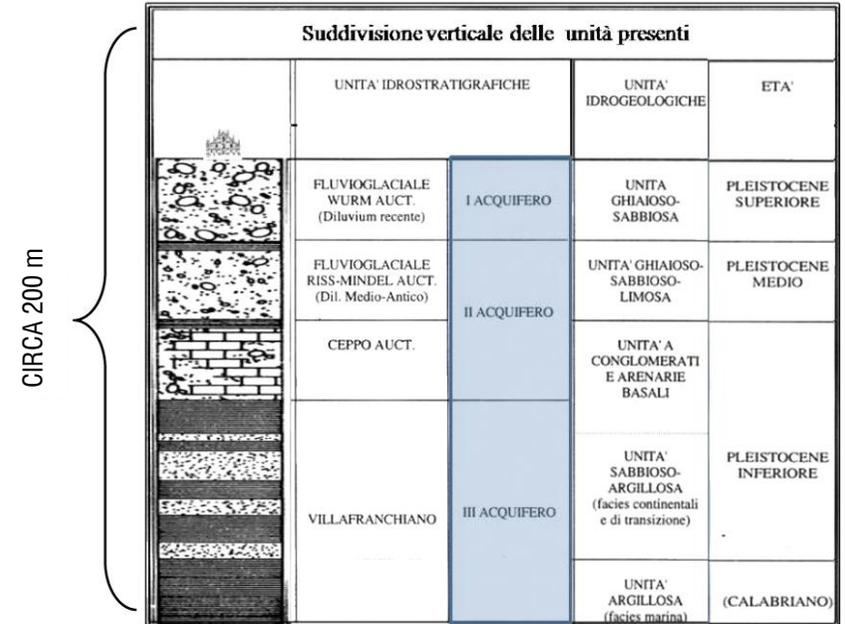
Legata prevalentemente alla glaciazione Würmiana, costituisce la pianura lombarda vera e propria con pendenza regolare da nord-ovest verso sud-est ed inclinazione pressoché costante di circa il 3 per mille.

**Unità geologiche**

Le unità geologiche che interessano l'area secondo la tradizionale descrizione adottata nella letteratura geologica (dalle più antiche a quelle più recenti e quindi dal basso verso l'alto) come sintenticamente indicate nella pagina seguente.



- Substrato roccioso pre-Pliocenico
- Unità Villafranchiana
- Ceppo
- Morenico Mindel
- Fluvio-glaciale Mindel
- Morenico Riss
- Fluvio-glaciale Riss
- Morenico Würm
- Fluvio-glaciale Würm
- Depositi lacustri
- Alluvioni antiche
- Alluvioni recenti



**FIG. 4.2.3.1.1**  
Unità geologiche

## 4.2.4 | STRUTTURA IDROGEOLOGICA<sup>3</sup>

### 4.2.4.1 Struttura degli acquiferi

La ricostruzione della struttura idrogeologica vuole individuare la geometria e la litologia del cosiddetto acquifero tradizionale, cioè di quei sedimenti che ospitano al loro interno le falde da tempo captate a varia profondità nella pianura milanese. L'acquifero è sottoposto ad un intenso sfruttamento e ad un forte degrado qualitativo, per lo meno in passato. Per lo studio delle caratteristiche idrogeologiche dell'area di studio si è dovuto innanzitutto scegliere un criterio di classificazione delle unità individuabili dalla interpretazione dei dati del sottosuolo.

I criteri considerati per tale suddivisione, derivati dagli studi sulle falde profonde, conducono alla suddivisione di seguito riportata e qui schematizzata.

In estrema sintesi la struttura degli acquiferi milanesi può essere sintetizzata come un vero e proprio sandwich costituito come segue:

#### **Unità ghiaioso-sabbiosa**

Questa unità è costituita da depositi alluvionali recenti e antichi, dai fluvioglaciali würmiani, in cui le frazioni limose e argillose risultano particolarmente scarse. Rappresentano arealmente la porzione più estesa del territorio della Provincia di Milano, costituito da una estesa superficie pianeggiante, incisa solamente dagli alvei attuali dei

fiumi Ticino, Olona, Lambro e Adda; sono definiti infatti “livello fondamentale della pianura”.

#### **Unità ghiaioso-sabbioso-limosa e conglomeratica**

Fanno parte di questa unità i depositi glaciali e fluvioglaciali antichi (Mindel e Riss Auct.) che si ritrovano in affioramento nell'alta pianura.

Dal punto di vista litologico si tratta di ciottoli, ghiaie e sabbie immerse in una matrice limoso-argillosa; nel sottosuolo si possono ritrovare anche livelli pedogenizzati. Anche per questa unità lo spessore è variabile e può arrivare a 40-50 m. In profondità sono presenti conglomerati e arenarie che, spostandosi verso Sud, sfumano nelle ghiaie e sabbie sciolte dalle quali si sono originati.

#### **Unità sabbioso-argillosa**

I litotipi che fanno parte di questa unità sono soprattutto argille e argille-limose tipicamente marine e depositi argillosi litorali, lagunari e paludosi insieme a torbe. In letteratura questa unità è spesso definita come “Argille sotto il Ceppo” e “Argille Villafranchiane”, mentre le falde in essa contenute sono denominate “falde profonde”.

Gli spessori di questa unità non sono sempre definibili con certezza, anche per i fenomeni tettonici che hanno interessato il settore Nord-Est dell'area di studio e che hanno portato, per conseguenza, ad una marcata erosione sin e postdeposizionale.

In generale si osserva un aumento degli spessori andando verso Sud e si passa da poco più di 100 m nella zona pedemontana, agli oltre 1000-1200 m al di sotto della bassa pianura. A prescindere da elementi tettonici locali, si individua una tendenza all'approfondimento andando da Nord verso Sud, con un'inclinazione media dello 0.5%.

---

<sup>3</sup> Si riportano di seguito alcune definizioni di carattere idrogeologico:

- acquifero: sedimenti di elevata permeabilità (ghiaie e sabbie, conglomerati e arenarie fessurati)
- aquitard: sedimenti di medio-bassa permeabilità (sabbie fini, limi-sabbiosi, sabbie e limi, limi e ciottoli)
- aquiclude: sedimenti di bassa permeabilità (argille, limi, argille e limi).

### Base dell'acquifero tradizionale

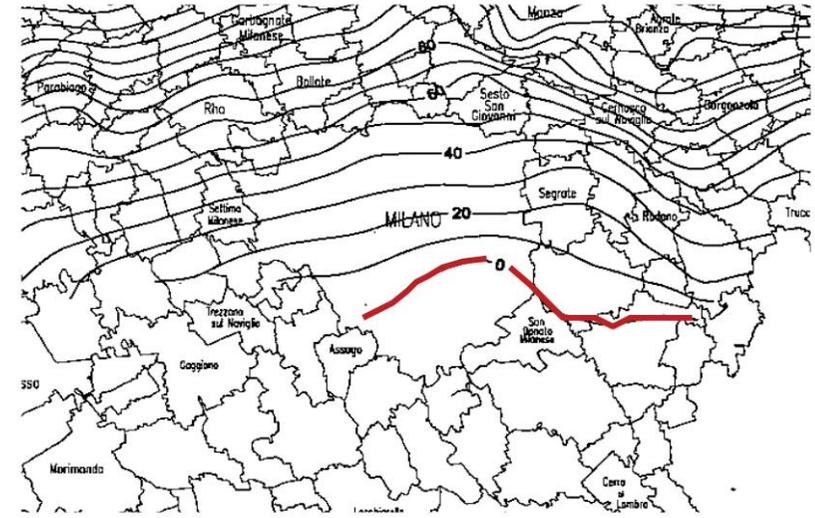
In letteratura è stata cartografata la base dell'acquifero tradizionale che costituisce quindi il limite inferiore delle falde maggiormente sfruttate della pianura milanese.

Il suo andamento che nella figura è riferito a quote sul livello del mare, è abbastanza regolare con valori che decrescono in generale da Nord verso Sud. Inoltre, poiché l'inclinazione generale della superficie della base dell'acquifero è superiore a quella topografica, procedendo verso Sud si assiste ad un incremento dello spessore dei depositi fluvioglaciali. A livello locale si registrano anomalie in corrispondenza sia dei fenomeni di sollevamento tettonico, già evidenziati, sia a fenomeni di tipo erosionale. Il territorio si può suddividere in tre aree principali all'incirca omogenee: il settore nord-occidentale, il settore nord-orientale ed infine il settore centrale.

A partire dalla parte meridionale di Milano la base dell'acquifero si incontra a quote inferiori all'attuale livello del mare (curva 0 m slm).

### Flusso idrico sotterraneo

Il territorio è interessato da rilevazioni del livello della falda che si prolungano per diversi decenni, risalendo in qualche caso agli inizi del secolo. Dagli anni ottanta la Provincia di Milano ha istituito il Sistema Informativo Falda (SIF) che dagli anni '80 raccoglie, cataloga e organizza tutti i dati piezometrici, producendo cartografia a differente dettaglio.



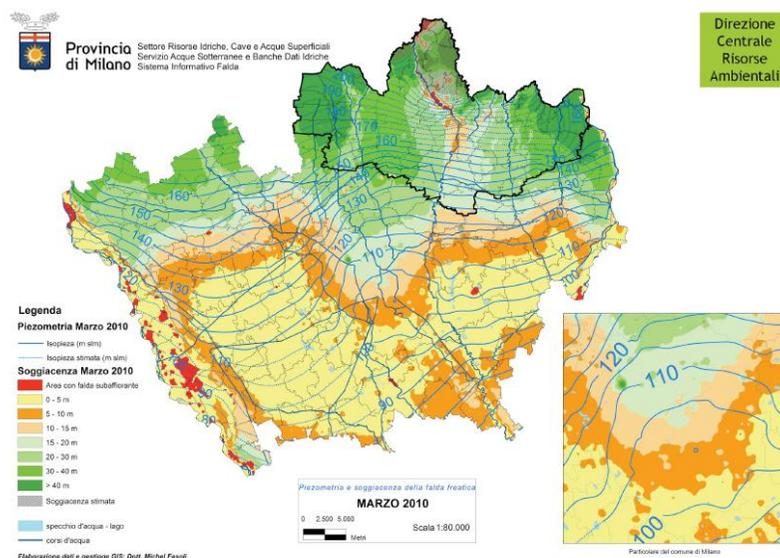
## Carta delle isopiezometriche

La carta nella figura qui riportata, tratta dal Sistema Informativo ambientale della Provincia di Milano, si riferisce al marzo 2010. In essa è indicato sia l'andamento piezometrico (in azzurro) sia la situazione della soggiacenza che tratteremo nel capitolo successivo. Sono stati utilizzati i pozzi appartenenti alla rete di monitoraggio delle acque sotterranee con livelli captati all'interno dell'acquifero tradizionale. Una prima osservazione che va fatta riguardo all'andamento generale del livello medio della falda tradizionale evidenzia la nota morfologia con linee di flusso prevalenti con andamento NNO-SSE. Tale direzione prevalente è influenzata sia dall'andamento generale della base dell'acquifero che dalla posizione della zona di recapito delle acque sotterranee costituita dal F. Po. Le quote piezometriche variano da oltre 220 m slm a Nord (Besana Brianza) a circa 75 m slm a Cerro al Lambro. Tale andamento generale tuttavia viene alterato principalmente da due situazioni di disturbo. La prima riguarda la parte centrale dell'area, occupata in prevalenza dall'abitato di Milano (vedi carta) e dalla sua zona periferica. La seconda componente di disturbo riguarda le zone laterali che sono invece influenzate dall'azione fortemente drenante dei corsi d'acqua principali, favorita anche in alcuni settori da una importante risalita della base dell'acquifero.

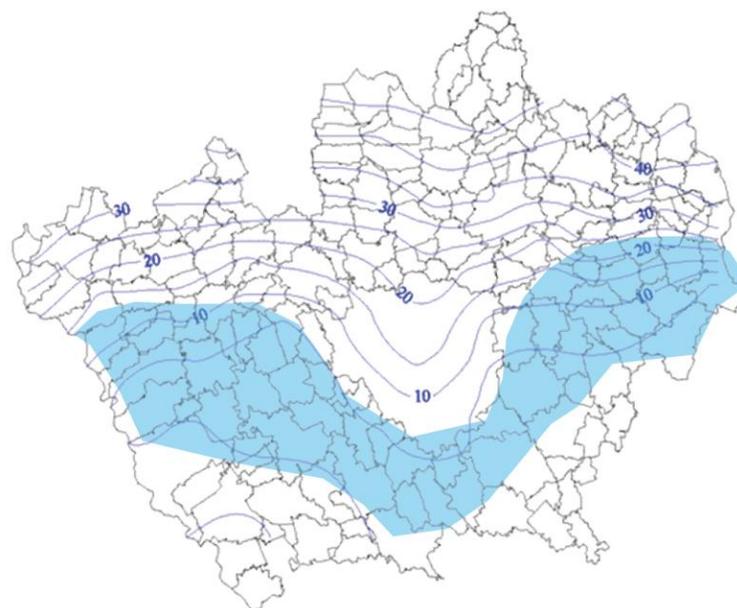
## Carta della soggiacenza

A differenza della carta delle isopiezometriche che viene riferita al livello del mare la carta della soggiacenza (a colori nella carta precedentemente analizzata) viene riferita alle rispettive profondità areali dal piano campagna fornendo un'informazione visivamente immediata dell'andamento della tavola d'acqua al di sotto della superficie del suolo.

Si fa ancora riferimento alla carta esposta al capitolo precedente in cui compaiono a colori i differenti valori di profondità della tavola d'acqua.



**FIG. 4.2.4.1.2**  
Carta delle isopiezometriche



Tale carta sopra riportata è ovviamente riferita ad uno specifico momento quale, in tal caso, il marzo del 2010. Pur tuttavia può essere indicativo riportare qui di seguito una elaborazione che mostra, unicamente a titolo d'esempio, come si configura mediamente nell'ultimo decennio l'andamento prevalente della soggiacenza freatica.

Da tale elaborazione media possiamo in pratica comprendere con immediatezza che i valori di soggiacenza media sono piuttosto elevati a Nord (30-40 m) e diminuiscono verso Sud anche a seguito di una costante diminuzione di permeabilità, annullandosi in pratica lungo la linea dei fontanili a sud della città. Infatti scendendo verso sud la tavola d'acqua si avvicina progressivamente al piano campagna intersecandolo sotto Milano ed andando così a creare, come già accennato in precedenza, quel fenomeno noto come "Linea dei Fontanili" lungo la quale per l'appunto è facilitata l'emersione di acque freatiche favorita dalla realizzazione di teste di fontanili. Anziché di linea sarebbe più opportuno parlare di fascia (in azzurro nella figura) generata dall'oscillazione annuale dei livelli freatici. Col tempo la diminuzione dei livelli di falda dagli anni '60 agli anni '80 e la mancata manutenzione delle teste di fontanili ha fatto sì che molti di essi si sono asciugati.

Oggi con l'innalzamento freatico registrato dagli anni '90 ed una pulizia specifica si potrebbe consentire la riattivazione di molte teste di fontanile. La fascia parallela all'asta del Ticino rappresenta l'allineamento delle risorgive poste al piede del terrazzo principale causate dall'abbattimento già citato della superficie freatica dovuta a tale intaglio. Altra caratteristica macroscopica ed immediatamente percepibile è l'incurvatura delle linee di uguale profondità in corrispondenza della città di Milano dovuta, come visto in precedenza, dalla quantità di prelievi concentrati all'interno della città. Senza tale disturbo le curve presenterebbero un andamento sostanzialmente rettilineo.

## Oscillazioni della falda

L'andamento delle oscillazioni piezometriche dipende sostanzialmente da fattori di ricarica ed apporti agli acquiferi (precipitazioni nelle aree a monte, fasce moreniche pedemontane, esondazioni, aree di disperdimento, etc.) e da fattori di perdita (prelievi da pozzo, trincee drenanti come accade ad esempio per lo scolmatore delle piene di NO, etc.).

La misura delle oscillazioni del livello piezometrico viene mensilmente effettuata su di una rete di rilevamento elaborata ed affinata nel corso degli anni e realizzata ad hoc per evidenziare l'andamento dei vari livelli monitorati. Le oscillazioni stagionali assumono valori che sull'areale si differenziano di oltre un ordine di grandezza. Si passa infatti dai circa 30 m di Briosco, ai 10 m di Lissone, ai 3-4 m nelle zone centrali della provincia fino a oscillazioni contenute all'interno del metro nelle zone meridionali a sud della città. Oltre a questo allineamento Nord-Sud, le oscillazioni si attenuano anche procedendo dal centro dell'area verso i corsi d'acqua laterali. Gli elementi principali che determinano questo comportamento sono costituiti sia dai corsi d'acqua Adda e Ticino che, in particolare, dal F. Po a Sud. Questi fiumi infatti determinano una forte azione regolatrice e stabilizzatrice dei livelli della falda, creando un effetto volano mentre nelle aree non interessate da tali presenze, le oscillazioni assumono caratteristiche molto più marcate.

Oltre al valore dell'escursione dei livelli è di interesse anche la posizione all'interno dell'anno del periodo di massima e di minima soggiacenza della falda. Infatti a livello areale si possono distinguere due zone a comportamento ben differenziato. Il limite di transizione di queste aree omogenee è costituito dal Canale Villoresi che costituisce quindi un netto crinale di spartizione. In particolare a Nord del canale (pianura asciutta) le oscillazioni sono influenzate principalmente dall'andamento delle infiltrazioni efficaci e dei quantitativi di acque sotterranee emunte; a Sud invece le oscillazioni

risentono in forte misura dell'andamento del periodo irriguo e d'altro canto delle asciutte (pianura irrigua). Così ad esempio a Rho i massimi livelli della falda (minima soggiacenza) si hanno nei mesi di agosto-settembre, mentre i minimi (massima soggiacenza) sono raggiunti tra marzo e aprile.

Oltre agli effetti correlati al Canale Villoresi è opportuno ricordare anche il carattere "perdente" di tutti i canali milanesi che utilizzati oggi prevalentemente a scopo agricolo sia con il sistema capillare di irrigazione ma anche e soprattutto dalle perdite dal fondo degli stessi arricchiscono notevolmente gli acquiferi superficiali sottostanti, fenomeno questo ben visibile durante i lunghi periodi di asciutta (la Sucia) durante i quali le rilevazioni piezometriche superficiali indicano connessi ed immediati abbassamenti.

In particolare secondo alcuni dati del Consorzio Villoresi riferentesi al 2006 le portate distribuite all'agricoltura da parte dei navigli sono i seguenti:

dal Canale Villoresi: mc 475.977.600

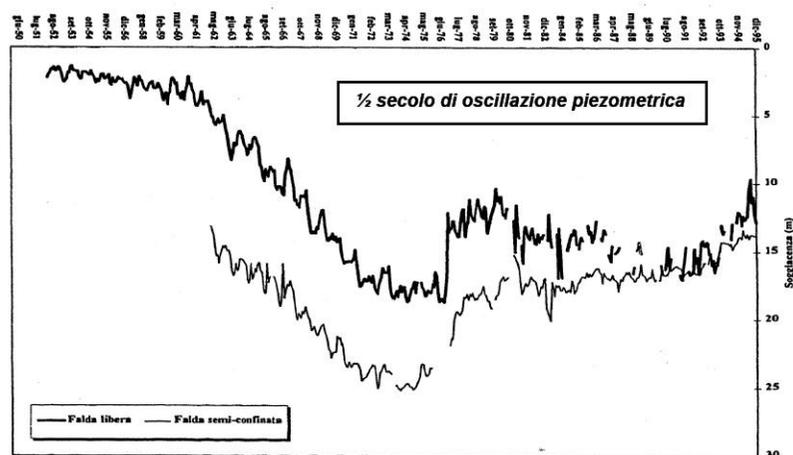
dal Naviglio Grande e Bereguardo: mc 943.783.488

dal Naviglio Pavese: mc 78.729.494

dal Naviglio Martesana: mc 415.644.480

Nel grafico seguente è riportato l'andamento della piezometria milanese durante circa 50 anni, che mostra la grande caduta degli anni '60/'70 la crisi petrolifera del 1976 e la successiva risalita degli anni '90.

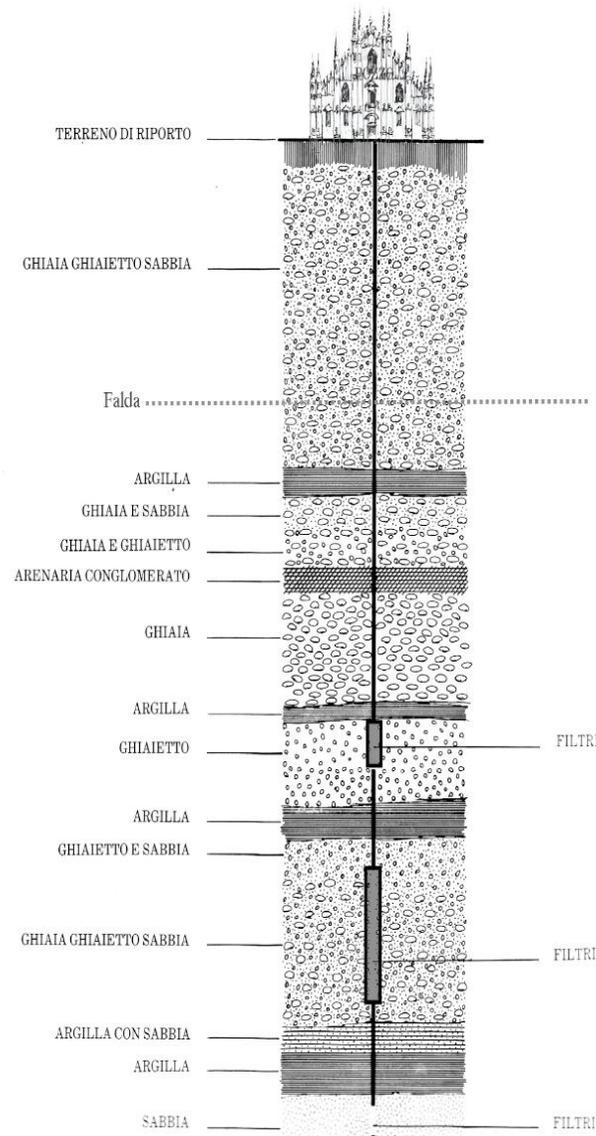
Per concludere questo capitolo particolarmente focalizzato sulla città di Milano risulta interessante inserire qui a lato una stratigrafia di tipo concettuale della città di Milano che ben evidenzia la struttura e le successioni litologiche presenti mediamente nel sottosuolo della città per una profondità massima di circa 150 metri.



**FIG. 4.2.4.1.4**  
Andamento della piezometria milanese

**FIG. 4.2.4.1.5**

Succezioni litologiche presenti nel sottosuolo della città di Milano.



## 4.2.4.2 Possibili interazioni tra il sistema dei Navigli e la struttura idrogeologica

Una volta definito con sufficiente chiarezza il quadro complessivo sia sotto il profilo geologico che sotto quello idrogeologico del territorio milanese ci è ora possibile valutare le interazioni esistenti tra il sistema dei Navigli e la struttura idrogeologica, intendendo per Sistema sia quei canali ancora funzionanti (Naviglio Grande, Pavese, Martesana, Bereguardo) sia la previsione di possibile rilettura di quella che era stata la fossa interna, ormai scomparsa ed oggi Cerchia dei Navigli.

Per fare ciò la prima importante considerazione da fare quali siano le possibili interazioni tra gli alvei dei canali e la tavola d'acqua sottostante.

A tale proposito va fatta una opportuna precisazione in quanto i dati di livello qui utilizzati sono quelli che è stato possibile reperire da varie fonti (Sistema Informativo Ambientale Provincia di Milano, Comune di Milano, MM, etc.) e ciò vale anche per le elaborazioni e la cartografia disponibile. A tale livello di approfondimento tali informazioni appaiono sufficientemente adeguate e dimensionate per la scala di lavoro che ci si è proposta. Qualora tuttavia si passasse da una fase di fattibilità ad una fase più strettamente progettuale e di dettaglio sarà necessario procedere ad effettuare misurazioni specifiche ad hoc in una rete piezometrica superficiale da individuare appositamente nell'immediato intorno dei canali da considerare.

## Caratteristiche tecniche dei canali

Per approfondire tali considerazioni è necessario riferirsi preliminarmente alle caratteristiche tecniche dei Navigli identificandone la struttura fisica nel territorio:

Caratteristiche tecniche dei Navigli

Canale	Anno d'inizio costruzione	Anno fine costruzione	Opera di presa	Arrivo	Lunghezza km	Larghezza Max.	Larghezza Min.	Profondità max.	Profondità min.	Portata max mc/sec	Portata min. mc/sec	Dislivello totale m	Classificazione	Conche	Bocche d'irrigazione	Ettari area irrigata	Comuni attraversati
Fossa interna	1155	1496	S. Marco (Laghetto) <sup>1</sup>	Conca di Viarenna	6,5	9		1,5	1	3		5	Interrata	3	30	-	1
Naviglio Grande	1177	1270	Ticino (Tornavento)	Darsena	50	40	12	3	1	60	14	34	Navigabile	0	116	48.000	19
Naviglio Pavese	1359	1819	Darsena	Ticino (Pavia)	33	12	10	1,5	1	7	1,7	59	Irriguo	14	25	9.000	12
Naviglio di Paderno	1518	1790	Adda	Adda	2,5	11		1,5		5		27	In parte ammalorato in parte per centrali idroelettriche	6	-	-	3
Naviglio Martesana	1443	1460	Adda	S. Marco	39	16	9	3	1	25	1	18	Irriguo	2	81	14.000	13

<sup>1</sup> Esisteva anche un tratto chiamato "Naviglio Morto" che percorreva l'attuale Via Carducci fino alla conca di Viarenna.

### FIG. 4.2.4.2.1

#### Caratteristiche tecniche dei navigli

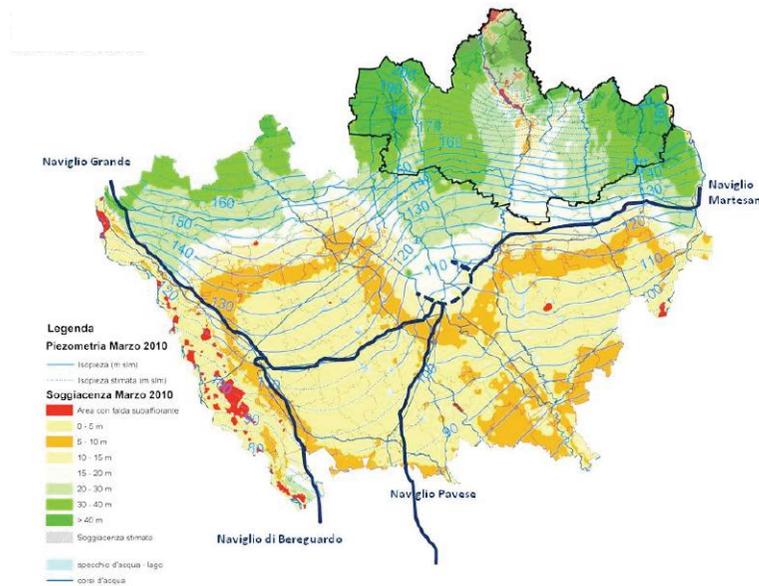
## Valutazioni sulle interazioni nel territorio esterno alla città

Passiamo ora ad analizzare le possibili interazioni tra le strutture sopra descritte e la tavola d'acqua iniziando ad approfondire il territorio milanese più esterno per passare poi a valutare con maggiore approfondimento il territorio cittadino.

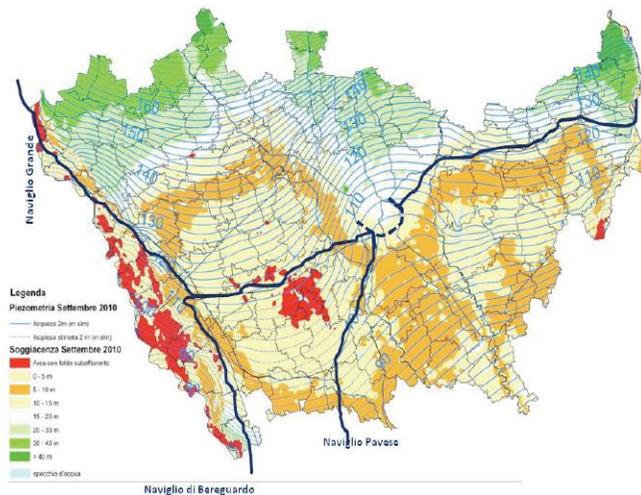
Si riporta pertanto di seguito la situazione piezometrica scaturita dai dati disponibili presso il Sistema Informativo Falda della Provincia di Milano.

Dalle due carte che seguono riferite ai minimi freaticometrici (marzo) ed ai massimi (settembre) si può rilevare che mentre nella stagione di magra raramente il livello freatico raggiunge il letto dei navigli esistenti attestandosi sporadicamente a meno di 5 metri, al contrario sembrerebbe che nei periodi di alto della falda superficiale tale distanza si riduca intercettando, in particolare per i Navigli Grande e Pavese, anche alcune aree di falda sub affiorante. In particolare per il Naviglio Grande mentre il percorso più a Nord (Magentino ed Abiate) corre a margine del terrazzo principale del Ticino e la caduta piezometrica da esso provocato mantiene la superficie freatica lontana dal letto del canale (eccezion fatta per il primissimo tratto adiacente al Ticino), dopo Cassinetta di Albairate svoltando bruscamente verso Est, attraversa la pianura milanese dove in taluni tratti l'innalzamento freatico, in particolare nella zona corrispondente alla fascia dei fontanili, potrebbe intercettare il fondo del canale. Analogo discorso potrebbe valere per il Naviglio Pavese nel suo tratto Milanese mentre l'andamento del Naviglio di Bereguardo è del tutto analogo a quanto accennato per il primo tratto del Naviglio Grande. Differente discorso riguarda invece il Martesana che scorrendo in una zona molto più settentrionale e pedecollinare con profondità di falda mai inferiore ai 10 metri, non intercetta mai in alcun periodo dell'anno la superficie freatica se non presumibilmente nel primissimo tratto dove corre in fregio all'Adda.

**FIG. 4.2.4.2.2**  
Interconnessioni tra Navigli e  
superficie piezometrica.  
Minimo freatico



**FIG. 4.2.4.2.3**  
Interconnessioni tra Navigli e  
superficie piezometrica.  
Massimo freatico



Ciò significa che nel corso dell'anno, mentre per alcuni periodi il letto dei canali è sospeso rispetto alla tavola d'acqua e quindi essi risultano perdenti e fonte di ricarica piezometrica, in altri, in particolare a fine estate, essi per brevi tratti potrebbero drenare l'acquifero acquisendo un debole contributo idrico che si va ad aggiungere alle normali portate prelevate da monte ma che tuttavia non sembrerebbe particolarmente significativo.

Tale situazione potrebbe comunque modificarsi ulteriormente qualora la tendenza generale dovesse mostrare ulteriori innalzamenti della piezometria generale.

#### Valutazioni sulle interazioni nell'areale cittadino

Passando ora ad esaminare più attentamente con una zoomata quello che si verifica nella città di Milano ed in particolare a quello che potrebbe essere un ipotetico recupero della Cerchia interna, ovviamente con una opportuna rilettura dettata da numerosissime esigenze ormai incancellabili, il rapporto con tale eventuale struttura e la falda è ben evidenziato nella carta a fianco.

In particolare il tracciato dell'antica Cerchia interna si andrebbe a collocare in pratica al centro della profonda depressione provocata dagli emungimenti della città di Milano con profondità anche superiori ai 15 metri (vedi carta delle isopiezometriche di pag. 12 e carta della soggiacenza di pag. 14) e quindi tale cono di depressione eviterebbe qualsiasi interconnessione tra un eventuale canale e la tavola d'acqua. Infatti il canale storico aveva profondità del fondo non superiori al metro e mezzo rispetto al piano campagna.

Tale situazione è anche ribadita dalle misure dell'anno in corso ed è evidenziata nella carta che si espone di seguito realizzata dagli uffici di Metropolitana milanese.

Ciò è ancora più evidente analizzando i dati di alcuni piezometri di prima falda presenti in città come indicato dalla planimetria riportata a fianco.

## Rilevazioni piezometriche

I dati qui esposti di seguito, che si riferiscono a misure mensili in un periodo di tempo compreso tra il 2010 ed il 2013 e i grafici che li comprendono, mostrano oscillazioni di profondità della falda freatica variabili ed in particolare, suddividendo grosso modo i piezometri per le rispettive aree di interesse si può definire quanto segue:

### Area Naviglio Grande:

Le oscillazioni variano da -9 a -15 tranne che per il piezometro 20 a Ronchetto S.N. (intorno ai -6) che è esterno alla città e comincia a non risentire più del cono di depressione.

### Area Naviglio Pavese:

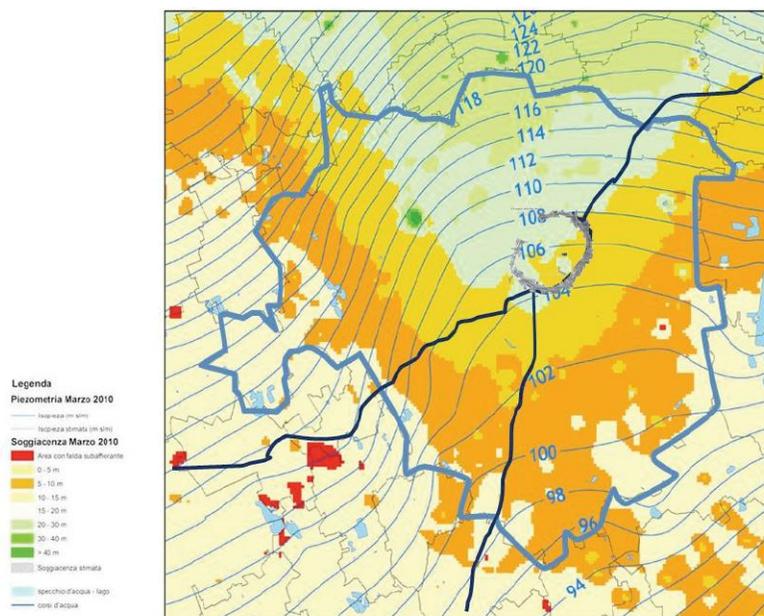
Le oscillazioni variano da -5 a -13 ed anche qui i valori inferiori sono molto esterni alla città (Via Orlando) per lo stesso motivo visto in precedenza

### Area Naviglio Martesana:

I valori variano in modo importante da -6 addirittura ai -18 del piezometro n. 8 in via Sturzo il più centrale e posizionato pressoché sopra il punto più profondo del cono di depressione.

### Area Cerchia:

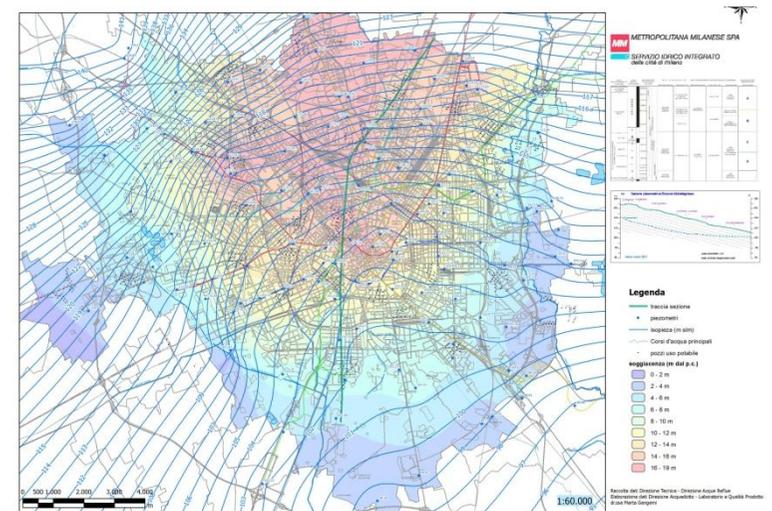
Trattandosi sempre di piezometri centrali per lo stesso motivo i piezometri n. 27 (Via Arena) n. 40 (Via Ariberto) e n. 41 (Via Ruffini) oscillano tra i 12 ed i 15 metri estremamente lontane quindi da quello che potrebbe essere il letto di un eventuale nuovo canale cittadino.



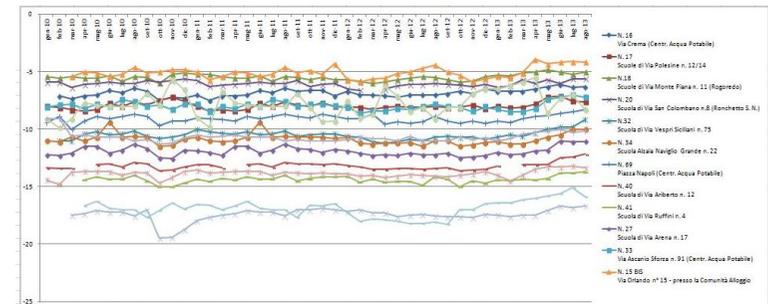
**FIG. 4.2.4.2.4**  
Interconnessioni tra Navigli e superficie piezometrica.  
Città di Milano.

Pertanto nell'eventualità di realizzare il nuovo canale una raccomandazione più che opportuna sarebbe quella di costituire un alveo totalmente impermeabile e tale da limitare al massimo eventuali perdite verso falda, cosa questa che potrebbe andare a costituire un ulteriore aggravio della situazione già descritta di danni subiti da varie strutture sotterranee a seguito dell'innalzamento freatico verificatosi negli ultimi decenni.

Analogo accorgimento andrebbe realizzato per i tratti di Navigli esistenti all'interno e nell'immediato intorno della Città, mediante una impermeabilizzazione del fondo tale da limitare ulteriore ricarica freatica.



**FIG. 4.2.4.2.5**  
Carta della piezometria e della soggiacenza della falda freatica  
Marzo 2013



### Area Naviglio Grande

	N. 20 Scuola di Via San Colombano n.8 (Ronchetto S. N.)	N. 32 Scuola di Via Vespri Siciliani n. 75	N. 34 Scuola Alzaia Naviglio Grande n. 22	N. 69 Piazza Napoli (Centr. Acqua Potabile)	N. 40 Scuola di Via Ariberto n. 12	N. 41 Scuola di Via Ruffini n. 4
gen-10	-5.90		--11.00	--9.40	--13.35	
feb-10	-5.90	--11.00	--11.10	--8.90	--13.40	-14.80
mar-10	-6.35	--11.00	--10.65	--10.00	--13.40	
apr-10	-6.10	--10.40	--11.00	--9.30		-14.40
mag-10	-6.00	--10.20	--10.70	--8.90	--13.10	-14.15
giu-10	-5.85	--10.45	--9.35	--9.10	--13.00	-14.35
lug-10	-6.00	--10.40	--10.70	--8.90	--13.30	-14.35
ago-10	-6.00	--10.15	--10.60	--8.70	--12.90	-14.00
set-10	-5.75	--10.60	--10.70	--8.90	--13.00	-14.50
ott-10	-5.90	--10.80	--11.50	--9.70	--13.60	-15.00
nov-10	-5.75	--10.70	--11.40	--9.30	--13.55	-15.00
dic-10	-5.60	--10.50	--10.85	--9.30	--13.25	-14.65
gen-11	-5.75	--10.00	--10.70	--9.00	--13.05	-14.35
feb-11	-6.25	--10.20	--11.00	--9.10	--13.10	-14.55
mar-11	-6.15	--10.35	--11.10	--9.15	--13.35	-14.25
apr-11	-6.10	--10.40	--11.00	--9.30		-14.40
mag-11	-6.00	--10.20	--10.70	--8.90	--13.10	-14.15
giu-11	-5.85	--10.45	--9.35	--9.10	--13.00	-14.35
lug-11	-6.00	--10.40	--10.70	--8.90	--13.30	-14.35
ago-11	-6.00	--10.15	--10.60	--8.70	--12.90	-14.00
set-11	-5.75	--10.60	--10.70	--8.90	--13.00	-14.50
ott-11	-6.30	--10.50	--10.65	--9.00	--13.00	-14.30
nov-11	-6.10	--10.40	--10.70	--8.70	--13.10	-14.15
dic-11	-6.00	--10.40	--10.80	--8.90	--13.00	-14.15

gen-12	-6.45	--10.60	--10.70	--9.10	--13.15	-14.10
feb-12	-6.60	--10.70	--11.20	--9.10	--13.25	-14.60
mar-12		--11.10	--11.30	--8.70	--13.50	-14.35
apr-12	-6.50	--11.20	--11.20	--9.55	--13.50	-14.60
mag-12	-6.20	--11.05	--11.20	--9.35	--13.40	-14.55
giu-12	-6.10	--10.90	--11.15	--9.50	--13.40	-14.55
lug-12	-6.10	--11.00	--11.45	--9.35	--13.50	-14.85
ago-12	-6.00	--10.70	--11.00	--8.90	--13.40	-14.15
set-12	-6.10	--10.60	--11.00	--9.30	--13.35	-14.35
ott-12	-6.15	--10.70	--11.45	--9.50	--13.60	-15.00
nov-12	-6.25	--10.70	--11.35	--9.30	--13.55	-14.50
dic-12	-6.10	--10.85	--11.15	--9.50	--13.45	-14.70
gen-13	-6.35	--10.65	--11.05	--9.30	--13.20	--14.40
feb-13	-6.20	--10.45	--11.30	--9.40		--14.45
mar-13	-5.70	--10.60	--11.30	--9.05	--13.10	--14.35
apr-13	-6.00	--10.30	--11.00	--8.90	--13.10	--14.40
mag-13	-5.70	--10.00	--10.70	--8.80	--13.10	--14.30
giu-13	-6.00	--9.80	--10.50	--8.60	--12.45	--13.80
lug-13	-5.60	--9.80	--10.00	--8.45	--12.40	--13.80
ago-13	-5.60	--9.15	--10.00	--8.30	--12.15	--13.70

<b>Area Redefossi</b>			
	N. 16 Via Crema (Centr. Acqua Potabile)	N. 17 Scuole di Via Polesine n. 12/14	N.18 Scuole di Via Monte Piana n. 11 (Rogoredo)
<b>gen-10</b>		--8.00	--5.40
<b>feb-10</b>	--7.10	--8.10	--5.55
<b>mar-10</b>	--7.35	--8.30	--5.40
<b>apr-10</b>	--7.10	--8.40	--5.55
<b>mag-10</b>	--7.00	--8.25	--5.55
<b>giu-10</b>	--6.60	--7.75	--5.35
<b>lug-10</b>	--6.80	--8.00	--5.80
<b>ago-10</b>	--6.40	--7.60	--5.40
<b>set-10</b>	--6.70	--7.90	--5.50
<b>ott-10</b>	--7.45	--7.50	--6.00
<b>nov-10</b>	--7.20	--7.20	--5.20
<b>dic-10</b>	--7.30	--7.55	--5.10
<b>gen-11</b>	--7.00	--8.00	--5.20
<b>feb-11</b>	--7.50	--8.40	--5.20
<b>mar-11</b>	--7.10	--8.30	--5.40
<b>apr-11</b>	--7.10	--8.40	--5.55
<b>mag-11</b>	--7.00	--8.25	--5.55

<b>giu-11</b>	--6.60	--7.75	--5.35
<b>lug-11</b>	--6.80	--8.00	--5.80
<b>ago-11</b>	--6.40	--7.60	--5.40
<b>set-11</b>	--6.70	--7.90	--5.50
<b>ott-11</b>	--6.60	--8.00	--5.70
<b>nov-11</b>	--6.60	--7.70	--5.50
<b>dic-11</b>	--7.10	--8.00	--5.70
<b>gen-12</b>	--6.70	--8.05	--5.70
<b>feb-12</b>	--7.00	--8.10	--5.80
<b>mar-12</b>	--7.00	--8.30	--6.00
<b>apr-12</b>	--7.05	--8.10	--5.90
<b>mag-12</b>	--7.20	--8.00	--5.70
<b>giu-12</b>	--7.00	--8.10	--5.55
<b>lug-12</b>	--7.00	--8.10	--5.40
<b>ago-12</b>	--7.00	--8.00	--5.50
<b>set-12</b>	--6.90	--8.10	--5.70
<b>ott-12</b>	--6.70	--8.10	--5.90
<b>nov-12</b>	--6.90	--7.90	--5.80
<b>dic-12</b>	--6.50	--8.20	--5.40
<b>gen-13</b>	--6.70	--8.00	--5.30
<b>feb-13</b>	--6.70	--8.15	--5.35
<b>mar-13</b>	--6.70	--8.10	--5.10
<b>apr-13</b>	--6.50	--7.80	--5.00
<b>mag-13</b>	--6.30	--7.20	--4.80
<b>giu-13</b>	--6.10	--7.10	--5.00
<b>lug-13</b>	--6.35	--7.55	--5.20
<b>ago-13</b>	--6.30	--7.60	--5.00

## Area Naviglio Martesana

	1 BIS Scuola Elementare di Via Mann n° 2	10 BIS Via Padova n° 91 - Interno Boccioflia	n. 53 Scuola Elementare di Viale Romagna n. 16	N. 73 Scuola Elementare di P.le Leonardo da Vinci n. 2	N. 8 Scuola di Viale Sturzo, n. 51/53
gen-10		--14.40	-9.10	--9.10	
feb-10		--14.80	-9.85	--9.10	
mar-10	--17.50	--13.75	-9.10	-10.60	
apr-10	--17.35	--13.65	-7.70	-10.50	-16.70
mag-10	--17.10	--13.65	-7.90	-10.65	-16.30
giu-10	--17.20	--13.70	-8.00	-10.70	-16.90
lug-10	--17.20	--14.00	-8.00	-10.70	-17.00
ago-10	--17.55	--13.75	-8.00	-11.00	-17.00
set-10	--17.00	--13.80	-6.90	-10.90	-17.70
ott-10	--19.50	--14.70	-7.90	-11.25	-17.10
nov-10	--19.40	--14.20	-5.65	-11.20	-16.40
dic-10	--18.75	--13.70	-6.55	-10.75	-16.95
gen-11	--17.95	--13.55	-9.00	-10.50	-16.55
feb-11	--17.65	--13.80	-9.80	-10.65	-16.60
mar-11	--17.50	--13.75	-6.70	-10.60	-17.00
apr-11	--17.35	--13.65	-7.70	-10.50	-16.70
mag-11	--17.10	--13.65	-7.90	-10.65	-16.30
giu-11	--17.20	--13.70	-8.00	-10.70	-16.90
lug-11	--17.20	--14.00	-8.00	-10.70	-17.00
ago-11	--17.55	--13.75	-8.00	-11.00	-17.00
set-11	--17.00	--13.80	-6.90	-10.90	-17.70
ott-11	--17.00	--13.90	-8.10	-11.00	-16.60
nov-11	--16.90	--13.80	-9.35	-11.00	-16.65
dic-11	--17.00	--13.90	-9.30	--11.00	-16.50
gen-12	--17.15	--13.90	-7.50	-10.90	-17.25
feb-12	--17.00	--14.05	-9.00	-10.70	-18.00
mar-12	--17.30	--14.00	-8.75	-10.80	-17.80
apr-12	--17.30	--14.20	-6.20	-10.80	-17.90
mag-12	--17.60	--14.10	-7.10	-11.00	-18.00

mag-12	--17.60	--14.10	-7.10	-11.00	-18.00
giu-12	--17.50	--13.95	-8.45	-10.60	-18.20
lug-12	--17.40	--14.00	-8.10	-11.00	-18.20
ago-12	--17.55	--14.10	-9.10	-11.00	-18.10
set-12	--17.60	--14.15	-8.10	-11.00	-18.30
ott-12	--17.60	--14.00	-8.10	-10.70	-17.00
nov-12	--17.70	--13.90	-6.90	-10.90	-17.00
dic-12	--17.40	--13.70	-6.50	-10.75	-16.45
gen-13	--17.45	--14.00	--6.45	--11.00	--16.40
feb-13	--17.60	--14.50	--6.20	--10.80	--16.40
mar-13	--17.50	--14.00	--5.90	--10.40	--16.15
apr-13	--17.50	--13.50	--5.50	--10.30	--16.00
mag-13	--17.10	--13.30	--8.60	--10.15	--15.80
giu-13	--16.70	--13.30	--7.35	--10.00	--15.60
lug-13	--16.80	--13.20	--7.00	--10.30	--15.05
ago-13	--16.65	--13.35	--8.30	--10.15	--15.90



**Area Naviglio Pavese**

	N. 27 Scuola di Via Arena n. 17	N. 33 Via Ascanio Sforza n. 91 (Centr. Acqua Potabile)	N. 15 BIS Via Orlando n° 15 - presso la Comunità Alloggio
gen-10	--12.20	--8.10	
feb-10	--12.30	--7.90	
mar-10	--12.10	--7.80	--5.40
apr-10	--11.50	--8.20	--5.00
mag-10	--11.50	--7.80	--5.10
giu-10	--12.10	--8.00	--5.40
lug-10	--11.80	--7.40	--5.20
ago-10	--11.30	--7.60	--4.60
set-10	--11.70	--8.00	--5.10
ott-10	--12.50	--7.90	--5.00
nov-10	--12.55	--8.30	--4.80
dic-10	--11.80	--7.80	--4.80
gen-11	--11.85	--7.80	--5.00
feb-11	--12.00	--8.50	--5.70
mar-11	--12.25	--8.00	--5.40
apr-11	--11.50	--8.20	--5.00
mag-11	--11.50	--7.80	--5.10
giu-11	--12.10	--8.00	--5.40
lug-11	--11.80	--7.40	--5.20
ago-11	--11.30	--7.60	--4.60
set-11	--11.70	--8.00	--5.10
ott-11	--11.75	--7.85	--4.90
nov-11	--12.00	--7.80	--5.20
dic-11	--11.75	--7.95	--4.30
gen-12	--11.90	--8.10	--5.70
feb-12	--12.10	--8.60	--5.90
mar-12	--12.30	--8.40	--5.60
apr-12	--12.20	--8.40	--5.55

apr-12	--12.20	--8.40	--5.55
mag-12	--12.25	--8.20	--5.15
giu-12	--12.10	--8.25	--5.00
lug-12	--12.20	--8.00	--4.70
ago-12	--12.20	--7.80	--4.40
set-12	--12.10	--8.00	--5.00
ott-12	--12.50	--8.10	--5.30
nov-12	--12.40	--8.45	--5.85
dic-12	--12.30	--8.05	--5.60
gen-13	--12.00	--8.25	--5.40
feb-13	--12.20	--8.50	--5.50
mar-13	--12.15	--8.50	--5.10
apr-13	--11.90	--8.20	--3.90
mag-13	--11.80	--7.40	--4.30
giu-13	--11.00	--7.20	--4.15
lug-13	--11.10	--7.00	--4.10
ago-13	--11.05	--7.20	--4.15

## 4.2.5 | CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

### Considerazioni generali di carattere geologico ed idrogeologico

Da quanto sopra esposto e dedotto dalla documentazione bibliografica disponibile, risulta confermata la notevole produttività idrica dell'area nella quale si inserisce Milano.

L'acquifero tradizionale si può sostanzialmente identificare come un monostrato nel quale è possibile distinguere principalmente tre falde in tutto il settore che comprende Milano e la parte meridionale della Provincia.

L'acquifero tradizionale ha inoltre le seguenti caratteristiche perfettamente conosciute in letteratura:

- presenta un rilevante spessore, che può superare i 70-80 m;
- è costituito da unità idrogeologiche diverse, con variazioni consistenti di permeabilità;
- ha una buona disponibilità di acque sotterranee che si traduce in portate specifiche dei pozzi anche superiori a 10-20 l/s-m;
- le falde superficiali (20/40 m) presentano una qualità estremamente scadente mentre la qualità delle acque migliora anche sensibilmente con la profondità (falde più protette);
- si osserva l'intercomunicazione con gli acquiferi più profondi nelle zone dell'alta pianura, soprattutto in corrispondenza dei corsi d'acqua maggiori. In altre situazioni spesso l'intercomunicatività è data dai vecchi pozzi per acqua;
- è possibile una limitata captazione di falde più profonde (150/200 m) solo in alcuni settori della pianura milanese e con volumi contenuti ma caratteristiche qualitative scadenti per la presenza di

sensibili quantità di sostanze quali ferro, manganese, ammoniaca e idrogeno solforato (acque marce).

La stragrande maggioranza dell'approvvigionamento idrico deve quindi provenire ancora dall'acquifero tradizionale, che risulta quindi la riserva sulla quale è necessario accentrare la massima attenzione sia per quanto riguarda una bonifica dei siti contaminati che per quanto concerne una futura tutela.

La distribuzione delle risorse idriche nell'acquifero tradizionale ha subito negli ultimi anni una variazione, evidenziata dalla comparazione dei dati climatici con le oscillazioni piezometriche .

Per quanto concerne le oscillazioni dei livelli (una consistente diminuzione dei livelli nella prima parte degli anni settanta, un aumento nella seconda parte degli anni settanta, una diminuzione negli anni ottanta, ed infine un recupero dei livelli, molto evidente negli anni novanta) si può rilevare che esse sono governate dagli eventi pluviometrici, dagli apporti irrigui, che mettono in circolazione volumi di acque mediamente superiori di 3-4 volte rispetto a quelli degli afflussi meteorici ma anche e soprattutto dai prelievi in negativo delle attività produttive, che in gran parte hanno cessato la produzione.

### Considerazioni in merito ai rapporti tra navigli e struttura geologica ed idrogeologica

Come visto in precedenza sulla base di dati documentali disponibili, si possono distinguere le seguenti differenti situazioni:

- dal punto di vista geolitologico tutti i terreni attraversati quasi sempre ghiaioso/sabbiosi, presentano mediamente elevatissima permeabilità più o meno costante, fino alla tavola d'acqua, con occasionali intercalazione argillose discontinue, rendendo la stessa falda a tali profondità vulnerabile da parte di inquinanti provenienti dalla superficie;

- per le zone sopra terrazzo fluviale (Ticino e Adda) e per gran parte della pianura attraversata, i navigli esistenti non interferiscono

direttamente con la tavola d'acqua ma sono sospesi al di sopra di essa, creando una situazione di accertata ricarica freatica dovuta alle acque distribuite in agricoltura, ed a perdite dal fondo;

- il sistema irriguo di rogge e canali dendriformi, collegato al sistema principale, fornisce enormi quantitativi di acque all'agricoltura gran parte delle quali contribuiscono fortemente all'incremento del livello della superficie freatica. In prossimità della città tale situazione contribuisce oggi a creare un grosso problema di innalzamento freatico;

- per alcune zone di pianura al contrario, in particolare coincidenti con la fascia dei fontanili, ad ovest ed a sud della città, vi è presenza di falde sub affioranti che almeno in alcuni periodi dell'anno potrebbero far sì che i canali si comportino come trincee drenanti, ma ciò sembrerebbe risultare un fenomeno limitato e senza particolare rilevanza sulla portata complessiva dei canali medesimi (in questi regimi);

- per l'eventuale ipotesi di scavo di un canale in concomitanza della cerchia dei Navigli non si rilevano particolari problemi essendo la superficie freatica profonda a causa qui, della presenza del rilevante cono di depressione causato dalla sommatoria dei prelievi della città di Milano.

Preme tuttavia ribadire il concetto per cui tutto quanto sopra vale ovviamente in una situazione di equilibri attuali con apporti e prelievi di tale dimensione e potrebbe ovviamente variare anche sensibilmente in presenza di variazioni significative che potrebbero intervenire alterando tale bilancio idraulico. Basti ricordare quanto già citato in precedenza in relazione ai significativi innalzamenti freatici verificatisi nei primi anni novanta a seguito della chiusura di molteplici prelievi industriali.

Per concludere questa prima analisi idrogeologica, che come detto si è basata sulla documentazione ed i dati disponibili, si ritiene che comunque in tutti i casi in esame (Navigli esistenti e ipotesi di

riapertura), sarebbe consigliabile, anche se estremamente costosa, l'impermeabilizzazione del fondo degli stessi almeno nell'areale urbano e periurbano per evitare perdite di portata e soprattutto per evitare ingenti apporti alla falda che, se un tempo potevano rappresentare un grande fattore positivo oggi, soprattutto in corrispondenza della città di Milano, con il rilevante innalzamento avvenuto, costituiscono un ulteriore aggravio di tale problema.

Sempre su questa strada sarebbe anche opportuno che le acque fornite dai Navigli all'irrigazione, almeno nelle aree più attigue alla città fossero utilizzate con sistemi di irrigazione a goccia anziché per scorrimento e laminazione come avviene ora e ciò per diminuire ulteriormente e sensibilmente tali apporti freatici diminuendo conseguentemente anche la necessità di richiesta di ingenti quantità di acque al sistema (soprattutto in periodi di magra) che sarebbero così più disponibili nel caso di riattivazione della navigazione.

Infine, in previsione del previsto approfondimento di studio passando da questa fase di pura fattibilità ad una fase più operativa ed approfondita di progetto, si rileva la necessità di disporre di una rete piezometrica più dettagliata e di campagne di misura specifiche e direttamente finalizzate al dettaglio dei movimenti e delle oscillazioni della superficie freatica esistente in tutti i tratti sottostanti i canali esistenti e quelli di prevista realizzazione.

### **I Navigli anche come strumento di sviluppo sostenibile**

E' ormai a tutti noto, come più volte sottolineato, che a Milano dai primi anni '90 siamo in presenza di una falda superficiale troppo alta che provoca problemi ad esempio ad alcuni tratti della metropolitana verde ed a molti parcheggi sotterranei.

Tale situazione, peraltro, potrebbe rivelarsi una magnifica risorsa in quanto la falda offre enormi potenzialità energetiche

(riscaldamento/raffrescamento) per la sua temperatura costante 12/14 gradi.

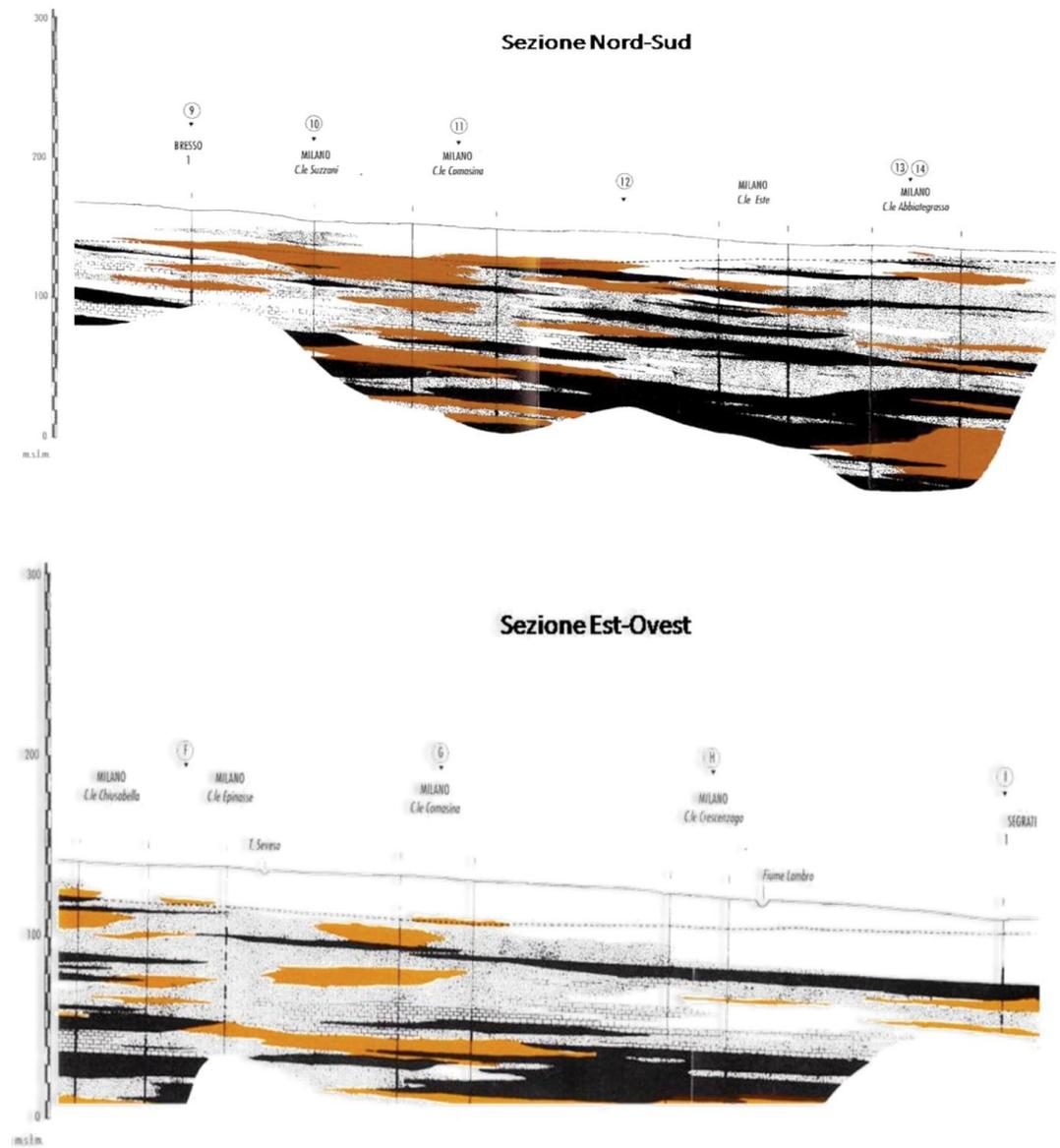
D'altro canto in città spesso è difficile lo sfruttamento di tale potenzialità con pompe di calore in particolare a seguito della lontananza di corpi idrici superficiali quali recettori. Infatti è assolutamente vietato lo sversamento in fognatura che produrrebbe una sgradita diluizione della massa organica ed un aumento spropositato delle portate da conferire a depurazione. A causa di ciò troppo spesso i progettisti si trovano nell'impossibilità di realizzare tali impianti e pertanto rinunciano allo sfruttamento di tale importante risorsa o vengono trovate soluzioni non corrette come ad esempio la reimmissione in falda con relativa alterazione delle temperature della stessa fatto questo assolutamente sconsigliabile.

Pertanto, poter finalmente disporre di un sistema distribuito di canali nel cuore della città, che si configuri anche quale recettore e collettore di tali acque pulite scaricate permetterebbe in primo luogo un razionale sviluppo di un vero sfruttamento energetico distribuito, che deve però essere supportato da una seria modellizzazione che ne controlli dimensioni e limiti sostenibili.

In secondo luogo si innescherebbe una riduzione dell'altezza della tavola d'acqua liberando ingenti risorse economiche impiegate per tutelare strutture a rischio (pozzi di emungimento). Non ultimo si realizzerebbe così un sensibile aumento delle portate d'acqua di buona qualità balneabile disponibili per l'utilizzo dei canali (le acque di falda sono sempre migliori di quelle superficiali) con un immediato vantaggio ad esempio per la riduzione dei tempi di concata necessari.

**FIG. 4.2.5.1**

Principali sezioni geologiche che attraversano la città di milano, nord-sud ed est-ovest.





## 4.3 PROPOSTA METODOLOGICA DI INDAGINE DEL SOTTOSUOLO URBANO PROPEDEUTICA ALLA FASE DI PROGETTAZIONE

Marco Proverbio e Mauro Mele

### 4.3.1 | PREMESSA

Da quanto esaminato nei paragrafi precedenti il quadro strutturale della geologia e dell'idrogeologia presenti nel sottosuolo di Milano è sufficientemente anche se sinteticamente chiaro e definito. Ora, partendo dalla considerazione che dal punto di vista geologico-stratigrafico il Naviglio si colloca di fatto nel primo sottosuolo di Milano fino ad una profondità di circa 4,0 da p.c., che nel contesto urbano in esame è costituito prevalentemente da terreni di riporto, frutto delle attività antropiche, si ritiene di primaria importanza fornire, già nell'ambito del presente studio una proposta di metodologia basata sull'applicazione di tecniche prospezione geofisica da superficie, a basso costo ed ampiamente consolidate nell'ambito professionale e scientifico, per acquisire quella serie di informazioni essenziali alla progettazione degli interventi di recupero, tutela, gestione e di valorizzazione del patrimonio archeologico costituito dai manufatti e dai rivestimenti spondali originali dei navigli milanesi.

La proposta persegue i seguenti scopi e sviluppa i seguenti contenuti:

1. valutare i possibili scenari di applicazione delle prospezioni geofisiche per la caratterizzazione pre-scavo delle sponde e dei rivestimenti spondali originali;

2. definire le potenzialità, i risultati attesi e le incertezze dei metodi, nelle migliori condizioni logistiche sito-specifiche ipotizzabili a priori;

3. valutare gli impatti sulle attività umane e sui manufatti di interesse, le tempistiche di esecuzione ed i costi delle attività.

### 4.3.2 | OBIETTIVI GENERALI E SPECIFICI

La stesura del presente documento nasce dalla constatazione che i manufatti ed i rivestimenti spondali originali dei Navigli e in particolare della Cerchia interna di Milano costituiscono, di fatto, un bene culturale ed archeologico (ai sensi de art. 148, D.Lgs., 31 marzo 1998, n° 112 in materia di Beni ed attività culturali) di primaria importanza nella storia della città di Milano, in quanto testimonianza di un assetto urbano passato avente valore di civiltà.

Gli obiettivi generali del presente documento consistono pertanto nel fornire un quadro generale delle possibili attività di carattere scientifico volte allo studio e la caratterizzazione preliminare pre-scavo dei manufatti originali, tuttora sepolti, attraverso prospezioni geofisiche da superficie (near-surface geophysics; [1], [2]) di natura indiretta e non-invasiva, ovvero senza ricorrere ad intervento distruttivi di natura diretta (e.g., scavi e trincee).

Nel contesto archeologico in esame, le prospezioni geofisiche si configurano quindi, ai sensi del DLgs 12 aprile 2006, n° 163 in materia di archeologia preventiva, come un necessario strumento di diagnostica e di analisi preliminare ([3], [4], [5], [6]), da effettuarsi allo scopo di ricostruire il quadro conoscitivo di sottosuolo più completo e consistente con il duplice obiettivo generale di:

- conciliare le esigenze di tutela dei beni archeologici con quelle più strettamente operative che comportano lavori di scavo e movimento terra;

- supportare la miglior progettazione dei successivi interventi di tutela, di gestione e di valorizzazione dei manufatti.

L'evidente complessità dell'opera originale, tuttora incastonata all'interno di un contesto altamente antropizzato, comporta, già nelle fasi di studio di fattibilità, l'esigenza di conoscenze specifiche riguardo al quadro degli interventi tecnici possibili e delle relative potenzialità e impatti sui manufatti e sull'ambiente urbano.

Alla luce di ciò, la prospezione geofisica da superficie può costituire, soprattutto in mancanza di dati bibliografici riguardanti la struttura e l'attuale stato dei manufatti sepolti, un valido ed efficace strumento di supporto:

- per la comprensione preliminare dell'estensione, dello spessore, dell'articolazione e della geometria dei manufatti e dei rapporti con le strutture adiacenti;
- per individuare situazioni anomale e locali, sconosciute o presunte;
- per meglio descrivere porzioni di manufatti noti allo scopo di taratura e calibrazione;
- per indirizzare in modo mirato le operazioni di scavo e consentire la miglior progettazione delle stesse in relazione alla sicurezza strutturale a cui sono collegati i calcoli e le verifiche proprie della progettazione geologico-tecnica;
- per indirizzare in modo mirato le operazioni di ordine tecnico-conservativo, per quanto attiene all'impiego di materiali, di metodologie esecutive e delle appropriate tecniche di intervento in funzione delle differenti tipologie di materiale spondale e di riempimento.

Alla luce di ciò, gli obiettivi specifici del presente documento consistono nel fornire un quadro specifico:

- delle prospezioni geofisiche applicabili al contesto;
- della metodologia di lavoro, articolabile in una fase di testing preliminare in aree selezionate, necessaria alla calibrazione, alla taratura ed alla verifica dell'applicabilità delle prospezioni, seguita da una fase di produzione effettiva lungo lo sviluppo urbano dei navigli;
- del coordinamento delle attività di cantiere nell'ottica di conciliare le esigenze di non invasività e di minor impatto sulle attività umane e sul traffico veicolare della cerchia interna di Milano;
- dei risultati attesi dalle prospezioni (nelle migliori condizioni logistiche sito-specifiche ipotizzabili a priori), anche attraverso una fase di simulazione numerica preliminare;
- delle potenzialità e delle incertezze legate sia al tipo di prospezione che al contesto sito-specifico (e.g., tipo di materiali coinvolti nello studio, profondità ed estensione dal piano campagna);
- delle attività accessorie ed integrative.

Gli elementi nel seguito descritti, che potranno essere sviluppati in successivi approfondimenti a livello progettuale, vengono proposti come una prima base di valutazione per:

- i) le attività di tutela dirette a riconoscere, conservare e proteggere i manufatti intesi come beni culturali e archeologici
- ii) le attività di gestione diretta, mediante l'organizzazione di risorse umane e l'applicazione di metodi e strumenti specifici, al perseguimento delle finalità di valorizzazione e riutilizzo dei manufatti.

### 4.3.3 | NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Nel seguito è riportato un elenco non esaustivo della normativa di riferimento che si dà per nota:

- art. 148 “Definizioni”, Capo V “Beni e attività culturali”, D.Lgs., 31 marzo 1998, n° 112 in materia di Beni ed attività culturali;
- art. 95 “Verifica preventiva dell'interesse archeologico in sede di progetto preliminare” in materia di archeologia preventiva, del DLgs 12 aprile 2006, n. 163, "Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE", pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 100 del 2 maggio 2006 - Supplemento Ordinario n. 107;
- art. 96 “Procedura di verifica preventiva dell'interesse archeologico”, comma 1, lettera b, in materia di archeologia preventiva, del DLgs 12 aprile 2006, n. 163, "Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE", pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 100 del 2 maggio 2006 - Supplemento Ordinario n. 107.

### 4.3.4 | STATO DI FATTO DELLE CONOSCENZE

Lo stato di fatto e le conoscenze circa la struttura della Cerchia dei Navigli e le tipologie dei materiali di riempimento che sono state impiegati per poter rendere viabile l'ex alveo, derivano principalmente da immagini storiche e dalla cartografia tecnica).

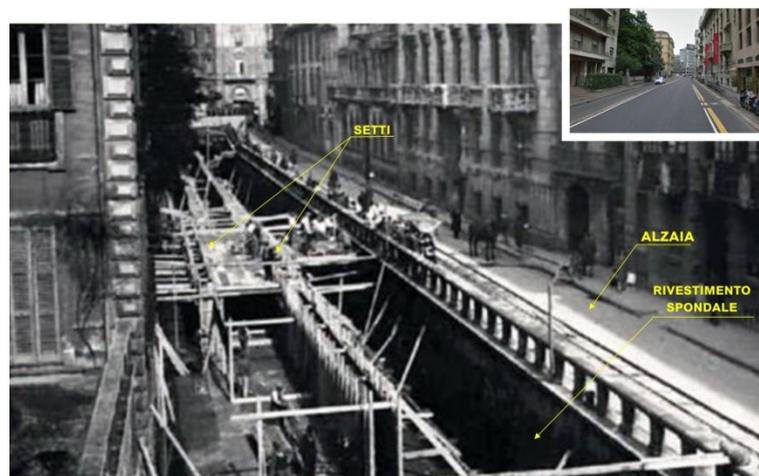
La struttura dell'antico alveo della Cerchia dei navigli desunta dalle foto storiche risalenti agli anni '30 e dalla cartografia tecnica, evidenzia come la copertura del canale venne realizzata solo in seguito alla posa due setti in calcestruzzo all'interno dell'alveo per il sostentamento delle travi di copertura. I setti determinarono la suddivisione dell'alveo in tre parti che vennero successivamente interrato nel corso di un intervento di consolidamento strutturale nel 1966.

La prima di queste tre parti, visibile a ridosso degli edifici sulla sinistra dell'immagine (Fig. 4.3.4.1, [11]), venne in parte occupata da un condotto fognario e da servizi tecnologici, mentre le altre due più centrali sostanzialmente rimasero libere da infrastrutture; l'alzaia storica dal lato opposto invece è sempre rimasta inalterata e costituita da terreno naturale.

La struttura, le dimensioni dell'alveo e dei setti e le tipologie dei materiali di riempimento sono rappresentati nella sezione schematica corrispondente (Fig. 4.3.4.2, [12]). Da notare che l'ampiezza originale del Naviglio lungo tutta la cerchia è di circa 10 m – 12 m per un'altezza della sponda di circa 4.0 m metri. Inoltre, la struttura del naviglio è asimmetrica in quanto l'alzaia risultava essere presente soltanto dal lato esterno della cerchia mentre la sponda interna del canale era situata a ridosso degli edifici.

Per quanto riguarda la sponda esterna è risaputo che il parapetto in pietra originale e all'incirca il primo mezzo metro di sponda storica dal piano di calpestio sono stati rimossi negli anni '30 per lasciare lo

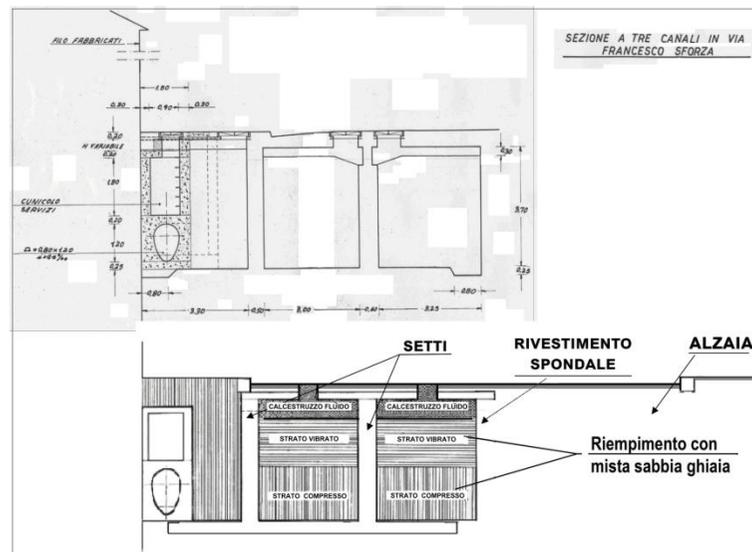
spazio necessario per la posa delle travi di copertura. Pertanto si ipotizza che attualmente della sponda storica originale si siano conservati all'incirca i rimanenti 3.5 m dal fondo dell'alveo.



**FIG. 4.3.4.1**

Foto d'epoca raffigurante la chiusura del naviglio in prossimità di via Senato, in direzione di p.zza Cavour.

In particolare, sono evidenti il rivestimento spondale, l'alzaia ed i setti di sostegno in calcestruzzo costruiti all'interno del canale.



**FIG. 4.3.4.2**

Esempi di sezione tipo del naviglio secondo la cartografia tecnica disponibile (sopra, [11]; sotto, [12]).

## 4.3.5 | PROPOSTA DI METODOLOGIA

### 4.3.5.1 Cenni sulla prospezione geofisica

Le prospezioni geofisiche (near-surface geophysics; [1], [2]) rappresentano un insieme di differenti metodi sperimentali per la caratterizzazione non invasiva della struttura del sottosuolo nei primi metri dal piano campagna. Il concetto alla base dell'applicazione di questi metodi consiste nel fatto che la presenza di manufatti e/o strutture nel sottosuolo può essere determinata sulla base della mappatura della variazione latero-verticale di alcune proprietà fisiche del terreno (quali ad es., conducibilità elettrica, costante dielettrica relativa, suscettibilità magnetica), misurabili dalla superficie terrestre con apposite strumentazioni e senza contatto diretto con le strutture oggetto dell'indagine. Esistono tecniche di prospezione attive (con immissione di campi artificiali) e passive (con misura di campi naturali) la cui fattibilità di utilizzo è, in linea generale, determinata da:

- profondità dei bersagli che si intende evidenziare;
- contesto fisico-geologico in cui essi si collocano, ovvero del terreno che li ingloba e della profondità di seppellimento;
- contesto logistico in superficie.

In particolare, i metodi più comunemente utilizzati nell'ambito geologico-geotecnico, ingegneristico ed archeologico sono quelli geoelettrici, elettromagnetici, gravimetrici, sismici e magnetici (Fig. 4.3.5.1.1). Ciascuno di essi, in funzione del contesto specifico, fornisce risposte differenti sulla base delle proprietà fisiche di riferimento, potenzialmente complementari tra loro e pertanto integrabili al fine di fornire gli elementi indispensabili ad una corretta e moderna progettazione e definizione dei modelli di sottosuolo sito-specifici. Nell'ambito della diagnostica archeologica, le prospezioni geofisiche assumono una grande importanza ([2], [3],

[5], [6]) in quanto, in condizioni di applicazione ottimali, consentono di avere una visione d'insieme delle strutture sepolte, in tempi rapidi, con costi contenuti e senza alcun intervento distruttivo, sulla base del contrasto più o meno marcato tra le proprietà fisiche dei bersagli e quelle del terreno che li ingloba.

METODO	TIPO	PRINCIPALI PROPRIETÀ FISICHE DI RIFERIMENTO	ACCOPPIAMENTO CON IL TERRENO
GEOELETRICA IN CORRENTE CONTINUA (DC)	ATTIVO	CONDUCIBILITÀ/RESISTIVITÀ ELETTRICA	TRAMITE ELETTRODI APPOGGIATI E/INFISSI NEL TERRENO
ELETTROMAGNETICO A RIFLESSIONE (GROUND PENETRATING RADAR)	ATTIVO	PERMEABILITÀ MAGNETICA, COSTANTE DIELETRICA, CONDUCIBILITÀ ELETTRICA	NULLO
SISMICA (RIFRAZIONE/RIFLESSIONE)	ATTIVO	PARAMETRI ELASTICI	TRAMITE GEOFONI APPOGGIATI E/INFISSI NEL TERRENO
MAGNETICO-GRADIOMETRICO	PASSIVO	SUSCETTIBILITÀ MAGNETICA	NULLO
ELETTROMAGNETICO	ATTIVO	CONDUCIBILITÀ/RESISTIVITÀ ELETTRICA	NULLO
MICRO-GRAVIMETRIA	PASSIVO	DENSITÀ	NULLO

**FIG. 4.3.5.1.1**

Confronto tra i diversi metodi di esplorazione geofisica e le proprietà fisiche di riferimento. Per ciascun tipo di prospezione è indicato il tipo di accoppiamento necessario tra il dispositivo di misura ed il terreno.

### 4.3.5.2 Metodi di prospezione applicabili al contesto

La complessità e le caratteristiche specifiche (e.g., estensione, profondità, spessore, tipo di materiali coinvolti) dell'opera originale, descritte nel paragrafo 4.3.4 "Stato di fatto delle conoscenze", ed il contesto altamente antropizzato rappresentano i fattori chiavi per la selezione preliminare delle prospezioni geofisiche attuabili nel contesto per la caratterizzazione pre-scavo delle sponde e dei rivestimenti spondali originali.

Tra le differenti tipologie (Fig. 4.3.5.1.1), le indagini che hanno la maggior probabilità di ottenere basi di dati utili agli scopi preposti sono quelle attive ed in particolare:

- la prospezione geoelettrica, nella sua configurazione 2-D *Electrical Resistivity Imaging* (ERI);
- la prospezione elettromagnetica *Ground Penetrating Radar* (GPR).

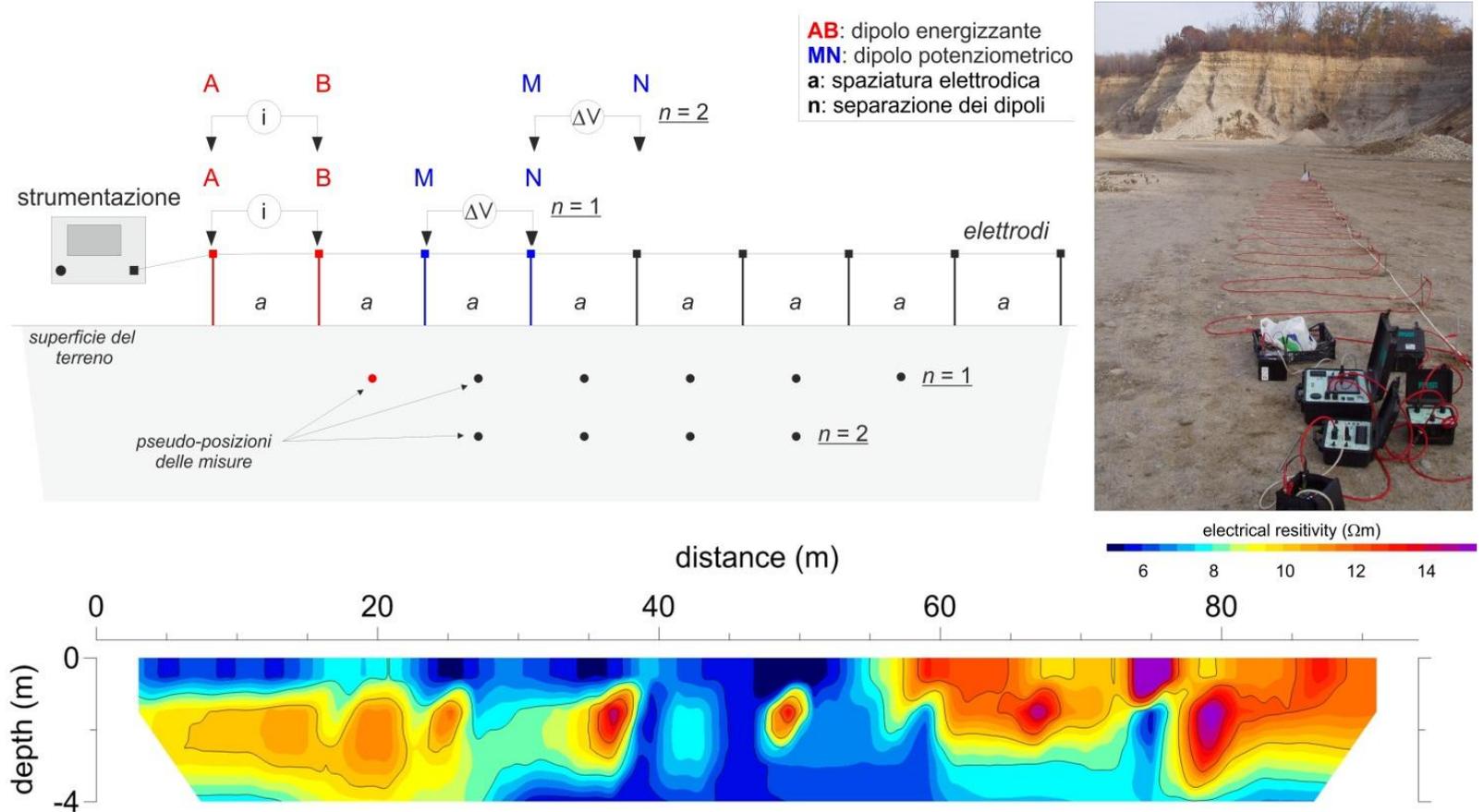
Di seguito sono descritti i principali caratteri delle due tecniche di prospezione, corredate da alcune considerazioni di carattere generale sull'utilizzo combinato delle due tecniche e sulla loro migliore integrazione.

#### La prospezione geoelettrica 2-D *Electrical Resistivity Imaging* (ERI)

La prospezione geoelettrica ([1], [2], [8]) si basa sulla possibilità di caratterizzare il sottosuolo in funzione della sua conducibilità elettrica (o il suo inverso, la resistività), la quale esprime la capacità del terreno di essere attraversato da un flusso di cariche (i.e., corrente elettrica) nel momento in cui al suo interno si venga a creare un campo elettrico, per cause naturali o artificiali. In

funzione dei valori e della distribuzione della resistività elettrica possono essere discriminati nel sottosuolo corpi geologici differenti, strutture antropiche ed eventuale presenza di fluidi. La resistività elettrica è infatti funzione delle caratteristiche quali il tipo di matrice solida presente (sedimenti sciolti o cementati; roccia integra o alterata; manufatti antropici ed archeologici) e delle eventuali fasi fluide e/o gassose presenti.

La prospezione geoelettrica in configurazione 2-D *Electrical Resistivity Imaging* (ERI; Fig. 4.3.5.2.1; [1], [8]) è una tecnica di prospezione che richiede l'utilizzo simultaneo di numerosi elettrodi (in genere 48) equispaziati (da 0.5 m a 5 m e più) e connessi tra loro da un cavo multipolare lungo linee di indagine lunghe decine di metri. Tale strumentazione consente di ricavare, dopo opportuno data-processing del dato sperimentale, un modello 2-D della distribuzione di resistività elettrica del terreno lungo dei profili di indagine lineari e per la profondità di indagine richiesta. La prospezione consiste nell'esecuzione di una serie di misure di corrente elettrica e di differenza di potenziale (Fig. 4.3.5.2.1) (in prima approssimazione, corrispondenti ad amperaggio inferiori a 0.5 A - 10 A e voltaggio inferiore a 10 V - 12 V) per mezzo di un dispositivo quadripolare nel quale, mantenendo fisso il centro di misura, viene incrementata la distanza tra gli elettrodi energizzanti AB e gli elettrodi potenziometrici MN. In questo modo, aumenta il volume di terreno investigato e, quindi, la profondità di esplorazione; in linea generale, la risoluzione verticale teorica minima dell'indagine (i.e. dimensioni minime di un target rilevabile) è, a parità di caratteristiche dei terreni attraversati, circa la metà della spaziatura elettrodica utilizzata



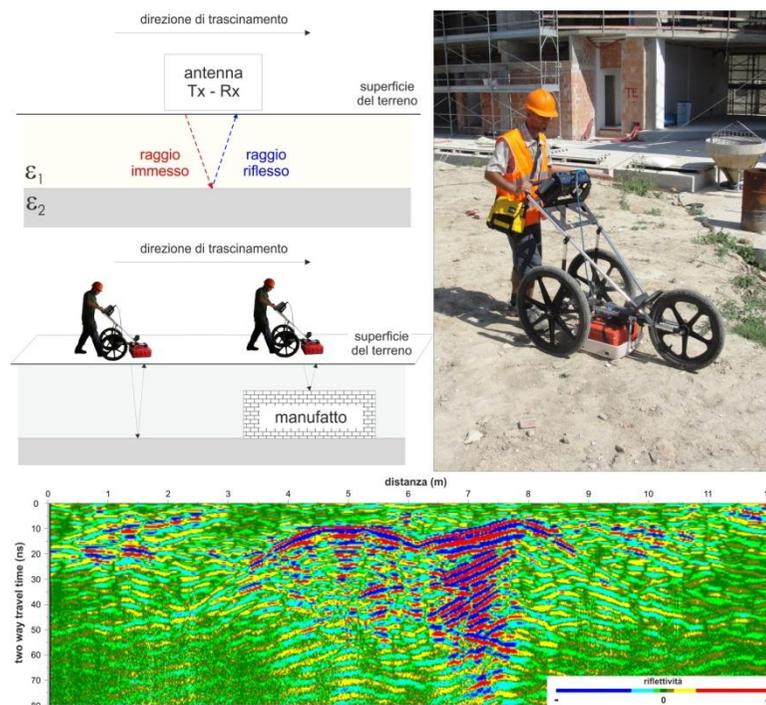
**FIG. 4.3.5.2.1**

Schema di acquisizione di un profilo di resistività elettrica 2-d in configurazione dipolo-dipolo (in alto) ed esempio di modello di resistività 2-d ottenibile (in basso; modificato da [7]).

## La prospezione Ground Penetrating Radar (GPR)

La prospezione georadar (*Ground Penetrating Radar*, GPR, Fig. 4.3.5.2.2; [1], [9]) è un sistema di prospezione elettromagnetica che sfrutta la propagazione delle onde EM nel terreno per localizzare oggetti e determinarne forma e dimensioni attraverso i corrispettivi echi riflessi. La profondità di indagine è inversamente proporzionale alla frequenza di picco delle onde elettromagnetiche irradiate dal dispositivo di misura ed alla risoluzione spaziale ottenibile. Un elevato grado di risoluzione è ottenibile ad alte frequenze di utilizzo (400-900 MHz e fino a 2.0 GHz), ma la profondità di penetrazione dei segnali è minore a causa del maggiore assorbimento per effetto Joule da parte dei materiali. Viceversa, profondità di esplorazione maggiori, seppur con minore grado di risoluzione, sono ottenibili utilizzando dispositivi a frequenze di picco inferiori (<270 MHz).

La strumentazione consiste in una serie di trasduttori (antenne) che vengono trascinate sulla superficie del terreno lungo un tracciato prestabilito (profili GPR). Le onde riflesse (echi) prodotte dalle superfici di discontinuità presenti nel terreno vengono raccolte da un'antenna ricevente, trasformate in segnale numerico e registrate sotto forma di tracce ampiezza del segnale riflesso vs. tempo di ricezione (in ns) da un'apposita unità di controllo. Il tipo di radar più comune è quello ad involuppo di impulsi, in cui un trasmettitore irradia periodicamente energia sotto forma di impulsi EM di grande potenza e di durata molto breve. L'onda irradiata si propaga nel terreno verso il basso e quando incontra un oggetto con proprietà dielettriche differenti dal terreno che lo contiene parte dell'energia viene riflessa e ritorna in superficie, parte viene assorbita dall'oggetto e parte penetra in profondità (Fig. 4.3.5.2.2). Tanto maggiore è il contrasto tra le costanti dielettriche caratteristiche dei bersagli e del materiale che lo circonda, tanto maggiore è la quantità di energia che viene riflessa verso la superficie.



**FIG. 4.3.5.2.2**  
Schema di acquisizione di un profilo gpr in configurazione monostatica (in alto) ed esempio di radargramma (in basso).

### Considerazioni generali sull'integrazione delle tecniche ERI e GPR

La scelta delle due tecniche di prospezione attive precedentemente illustrate è giustificata dal fatto che, benché non siano le sole prospezioni in grado di misurare variazioni delle proprietà fisiche del terreno prodotte dalla presenza di manufatti, esse rappresentano il miglior compromesso tra la risoluzione ottenibile da superficie, la profondità di investigazione, le geometrie e la natura dei materiali costitutivi le sponde ed i rivestimenti spondali originali e le condizioni logistiche sito-specifiche.

Infatti, in assenza di fattori limitanti non valutabili in questa fase di valutazione di fattibilità, tali manufatti rappresentano degli obiettivi potenzialmente raggiungibili da questi metodi in quanto presentano delle caratteristiche fisiche ragionevolmente differenti dai terreni naturali in posto e di riempimento/riporto.

Per quanto riguarda le sponde, l'utilizzo di blocchi di pietra per la loro costruzione, con spessore indicativo di circa 30-40 cm ed altezza pari a 3.0 m – 4.0 m (Fig. 4.3.4.2), di fatto contribuisce nei termini della presenza di un materiale dielettrico, cioè elettricamente isolante, e pertanto caratterizzato da resistività elettrica e costante dielettrica relativamente più elevate rispetto ai terreni adiacenti e per le quali è ragionevole ipotizzare, rispettivamente, una associata anomalia di resistività elettrica positiva, rilevabile con opportuna arrangiamento in superficie di una strumentazione ERI, ed una serie di discontinuità elettromagnetiche in grado di riflettere i segnali generati dalla strumentazione GPR.

D'altra parte, l'utilizzo di mattoni per la costruzione delle sponde, benché essi rappresentino un target più difficilmente risolvibile in quanto è inferiore il contrasto tra resistività elettrica/costante dielettrica caratteristica e quelle dei terreni circostanti, potrebbe essere allo stesso modo messo in evidenza interpretando la struttura

del sottosuolo in termini di assenza di una spiccata anomalia di resistività e/o riflessioni prodotte dalla presenza di blocchi di pietra.

Allo scopo di rendere chiara questa valutazione, in Fig. 4.3.5.2.3 viene riportato un confronto, effettuato a parità di condizioni logistiche sito-specifiche, tra le caratteristiche specifiche delle prospezioni ERI e GPR ed una serie di parametri qualitativi ritenuti, in via preliminare, come cruciali al fine del buon esito delle indagini, quali: profondità di esplorazione, risoluzione spaziale, efficacia nella rilevazione di strutture verticali, ubicazioni di sottoservizi e reti tecnologiche, suscettibilità all'interferenza di manufatti superficiali (e.g., sottoservizi) e velocità di acquisizione dei dati.

Dall'analisi della Tabella, risulta che entrambe le tecniche hanno risoluzione spaziale adeguata ai bersagli da ricercare, mentre la profondità di esplorazione risulta più limitata per la prospezione GPR. La tecnica con maggiore potenzialità di successo è pertanto la prospezione geoelettrica 2-D *Electrical Resistivity Imaging* (ERI). Ciò è in relazione al fatto che essa è più adatta rispetto al GPR nell'identificazione di strutture e manufatti verticali, quale è la sponda ed il relativo rivestimento, ed è meno influenzata dalla presenza di manufatti superficiali (e.g., sottoservizi e reti tecnologiche) che localmente possono risultare di ostacolo per la propagazione delle onde elettromagnetiche.

D'altra parte, proprio per questo motivo, l'utilizzo della prospezione GPR è comunque opportuno e consigliabile in quanto risulta essere cruciale per la determinazione speditiva e totalmente non invasiva della posizione dei sottoservizi e delle reti tecnologiche, eventualmente presenti nelle aree di indagine, e la cui conoscenza è necessaria i) per il miglior posizionamento in sicurezza delle linee di indagine ERI e ii) per la valutazione di eventuali disturbi, altrimenti non valutabili, da essi prodotti sulle misure ERI.

In conclusione, è opportuno sottolineare che la miglior strategia operativa è quella che prevede l'utilizzo incrociato delle due metodologie di esplorazione, caratterizzate entrambe da bassi costi ed impatti (cfr. paragrafo 4.3.8 “*Valutazione indicative delle tempistiche e dei costi*”), in quanto la loro integrazione consente di collezionare una base di dati utile a verificarne l'applicabilità al particolare contesto specifico e, soprattutto, di ottenere informazioni utili a fornire un quadro conoscitivo, superiore sia dal punto di vista quantitativo e qualitativo sia dal punto di vista delle possibili interferenze sulle misure da parte di strutture superficiali, ritenuto imprescindibile al riconoscimento della anomalie geofisiche associate ai materiali costitutivi le sponde ed i rivestimenti spondali originali.

Maggiori dettagli vengono forniti nel successivo paragrafo in cui viene presentata una possibile modalità operativa basata sulle due tecniche descritte.

METODO	PROFONDITÀ DI ESPLORAZIONE	RISOLUZIONE SPAZIALE	RILEVAZIONE A STRUTTURE VERTICALI	RILEVAZIONE SOTTOSERVIZI	INTERFERENZA DA MANUFATTI SUPERFICIALI	VELOCITÀ DI ACQUISIZIONE
2- D EARTH RESISTIVITY IMAGING (ERI)	😊😊	😊😊	😊	😞	😞	😊
GROUND PENETRATING RADAR (GPR)	😞	😊😊	😞	😊😊	🔴🔴	😊😊

**FIG. 4.3.5.2.3**

Confronto tra le caratteristiche specifiche delle prospezioni eri e gpr a parità di condizioni logistiche sito-specifiche.

### 4.3.6 | ESEMPIO DI STRATEGIA DI ACQUISIZIONE DEI DATI E DEI RISULTATI ATTESI

Nel seguito, viene sviluppata la proposta metodologico-operativa per la caratterizzazione delle sponde e dei rivestimenti spondali originali utilizzando la prospezione geoelettrica, nella sua configurazione 2-D *Electrical Resistivity Imaging* (ERI; [1], [8]), integrata attraverso la prospezione elettromagnetica Ground Penetrating Radar (GPR; [1], [9]) per quanto riguarda la determinazione di possibili interferenze superficiali (sottoservizi e reti tecnologiche) alla luce di quanto esposto nel precedente paragrafo.

Le finalità della proposta metodologico-operativa consistono in:

- determinare la presenza, lo spessore, la geometria dei manufatti;
- individuare situazioni anomale e locali, sconosciute o presunte;
- identificare, laddove possibile, differenti tipologie di materiale spondale e di riempimento.

Il design del progetto di intervento comprende 2 pacchetti di lavoro (*working-packages*; WP), nel seguito descritti in dettaglio, e che comprendono, rispettivamente:

- una fase di *testing* preliminare (denominata WP-1) in aree-pilota selezionate sulla base di opportuni criteri, al fine della valutazione dell'effettiva efficacia delle tecniche diagnostiche pre-scavo;

- una successiva fase di produzione (denominata WP-2) da avviarsi, in caso di riscontri positivi ottenuti nella WP-1, lungo lo sviluppo urbano dei navigli.

La configurazione temporale del progetto è illustrata nel diagramma di Gantt semplificato discusso nel paragrafo 4.3.8 “*Valutazione indicative delle tempistiche e dei costi*” e presentato in Fig. 9.

#### WP-1: testing preliminare in aree pilota

La prima fase di lavoro (WP-1) prevede lo studio di aree campione, di estensione areale limitata (nel seguito indicate con *blocks*, BL), sia attraverso simulazioni numeriche preliminari che attraverso acquisizione di dati sperimentali reali e relativo *data-processing*.

In particolare, in via preliminare si prevede di studiare alcuni BL pilota, centrati sulla presunta posizione della sponda ed allineati ad essa, corrispondenti ad un tratto longitudinale rispetto alla carreggiata di lunghezza non inferiore a 23.5 m e larghezza pari a 10 m (Fig. 4.3.6.1). Le dimensioni e la posizione dei BL saranno scelte in maniera da avere informazioni su un tratto di sponda ed un volume terreno sufficiente per poter essere considerati rappresentativi del tratto di sponda ed ampi abbastanza da poter valutare eventuali disturbi locali prodotti da interferenze superficiali.

A questo scopo, dovranno essere preferibilmente scelte delle aree:

- per le quali, attraverso dati indipendenti, siano note, totalmente o in parte, la posizione delle sponde rispetto all'asse stradale ed il tipo di rivestimento spondale originale allo scopo di effettuare taratura e calibrazione dei metodi;
- che siano rappresentative per tipologia di condizioni sito-specifiche, quali ad esempio il tipo di pavimentazione attuale (e.g., asfalto, pavè) e larghezza della carreggiata disponibile alle collocazioni delle strumentazioni di misura;

all'interno delle quali sia ridotto, o quantomeno tracciabile con la maggior certezza anche attraverso l'utilizzo della prospezione GPR, la presenza di sottoservizi e reti tecnologiche.

All'interno dell'estensione dei navigli, alcune aree presentano queste caratteristiche tra cui: Via Senato, Via Edmondo De Amicis e Via Molino delle Armi. All'interno dei tre sopraccitati BL pilota, l'acquisizione dei dati sarà organizzata come illustrato in Fig. 4.3.6.1:

- acquisizione di profili GPR a riflessione con la tecnica del rilievo 3-D, ovvero attraverso profili lineari e paralleli realizzati a griglia ortogonale e passo fino ad un minimo di 0.5 m, corrispondenti ad un tratto longitudinale rispetto alla carreggiata di lunghezza 23.5 m e larghezza pari a 10 m (Fig. 4.3.6.1) al fine di determinare la presenza di interferenze superficiali, quali sottoservizi e reti tecnologiche. Tale configurazione corrisponde alle disposizioni in norma di diagnostica preventiva per le strutture di sottosuolo contenute nella norma CEI 306- 8 "Impiego del radar per introspezione del suolo per prospezioni preliminari ad opere di posa di servizi ed infrastrutture sotterranee" la quale, al fine del buon esito dell'indagine, potrà essere integrata effettuando un contestuale rilievo tramite dispositivo di radio-localizzazione tipo "cercaservizi" per la determinazione di cavidotti eventualmente in tensione. In questa fase, l'utilizzo di mappe pregresse relative al posizionamento dei sottoservizi, reperibili presso gli Enti pubblici e privati di riferimento, potrà aumentare il dettaglio della ricostruzione;
- acquisizione di n° 2 linee ERI in configurazione dipolo-dipolo (Fig. 4.3.6.1) trasversali all'asse stradale, con passo elettrodo pari a 0.5 m ad altissima risoluzione ed occupanti la massima estensione della carreggiata disponibile, marciapiedi compresi. Tali sezioni sono effettuate allo scopo di determinare in via preliminare la posizione della sponda sepolta rispetto al centro

della strada (Fig. 4.3.6.2) e potranno essere ubicate in sicurezza grazie ai risultati ottenuti dalla prospezione GPR;

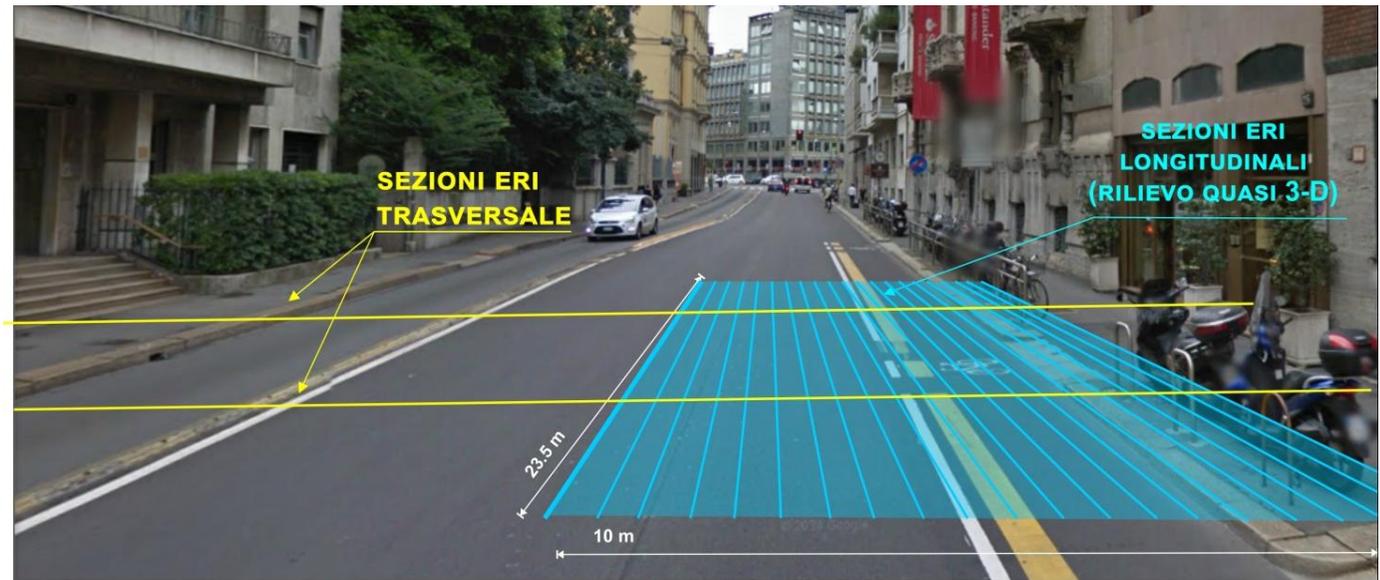
- acquisizione di n° 21 linee ERI in configurazione dipolo-dipolo (Fig. 4.3.6.1) parallele all'asse stradale, equispaziate di 0.5 m, con passo elettrodo pari a 0.5 m ad altissima risoluzione, di lunghezza non inferiore a 23.5 m ed ubicate simmetricamente rispetto alla posizione preliminare desunta dalla sezione ERI di cui al punto 1);

Attraverso questo schema di acquisizione, per ciascuna linea ERI potranno essere acquisiti fino a 600 misure di resistività elettrica apparente collocate a differenti profondità. In particolare, per le sezioni longitudinali, ovvero parallele all'allineamento presunto della sponda, in relazione alle caratteristiche specifiche della restituzione dei dati ottenibili dalla prospezione ERI (sezioni lunghezza Vs. profondità vs. resistività di forma trapezoidale, Fig. 4.3.5.2.1), l'arrangiamento strumentale consentirebbe di acquisire informazioni utili fino ad una profondità di esplorazione paragonabile a quella dei materiali naturali alla base delle sponde (circa 4.0 m p.c.) in un tratto di lunghezza almeno pari a 10 m ed al centro dell'area di indagine. I dati così ottenuti saranno trattati attraverso opportuni *software* che utilizzano codici di calcolo alle differenze finte per ricavare, attraverso la soluzione del problema inverso (*inverse-modeling*), un modello *quasi*- 3-D delle proprietà elettriche del sottosuolo investigato utile a determinare e a riconoscere le presenza di anomalie geoelettriche riconducibili alle sponde e dei rivestimenti spondali originali.

Poiché vari fattori, tra cui le caratteristiche intrinseche dei metodi di prospezione da superficie abbinata alla complessità della propagazione dei campi elettrici ed elettromagnetici nel sottosuolo eterogeneo, possono mascherare e limitare il riconoscimento delle strutture complesse anche a bassa profondità, il cui riconoscimento è di fatto lo scopo del WP-1, alla fase di lavoro sui dati sperimentali

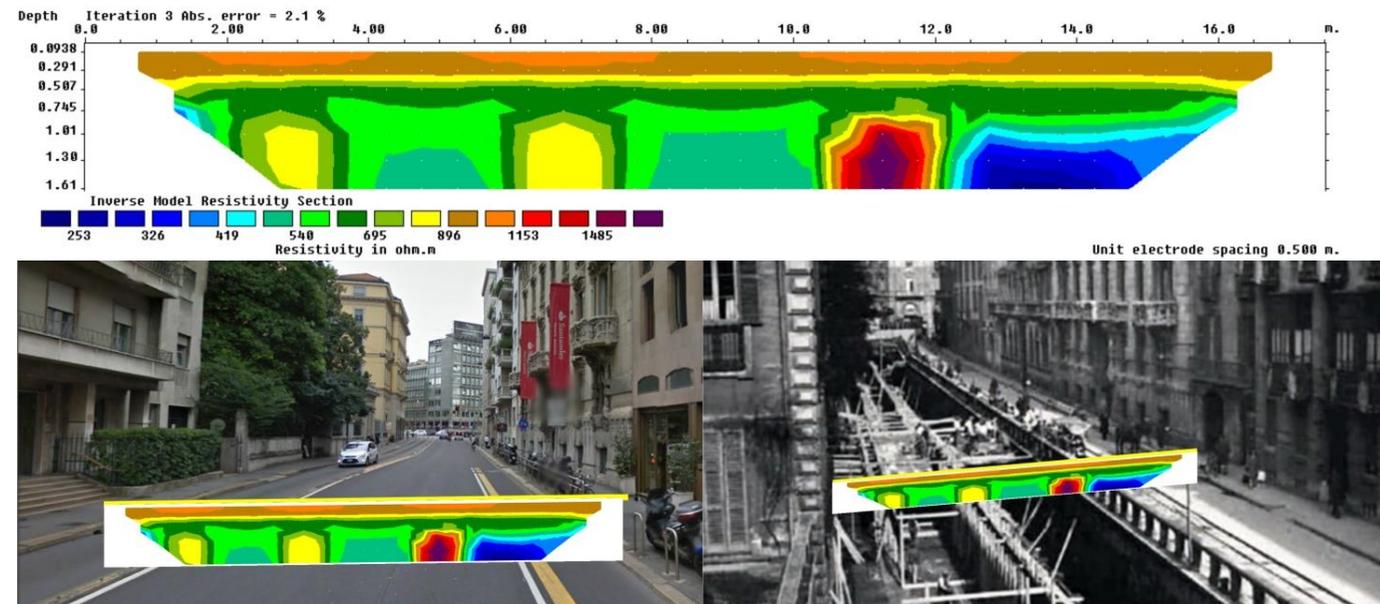
**FIG. 4.3.6.1**

Ipotesi di ubicazione delle linee di indagine eri trasversali e longitudinali alla carreggiata nel sito di via senato (cfr. Fig. 4.3.4.1).



**FIG. 4.3.6.2**

Esempio di simulazione della sezione trasversale di resistività attesa (vedi il testo per i dettagli) nel sito di via senato secondo il modello 2-d di sottosuolo presentato in fig. 4.3.6.3.



di resistività dei BL sarà affiancata una fase di simulazione numerica della struttura di sottosuolo attraverso *forward-modeling*.

Lo scopo di questa fase di lavoro è ottenere un'immagine elettrica sintetica della struttura delle sponde e dei rivestimenti spondali originali, basata su una "sezione tipo" e su una stima delle proprietà elettriche dei materiali costituenti (Fig. 4.3.6.2, Fig. 4.3.6.3).

Tale sezione sintetica, integrata con i risultati ottenuti dalla prospezione GPR all'interno dell'area di indagine e relativi alla presenza di interferenze superficiali (sottoservizi e reti tecnologiche), potrà aiutare la fase di interpretazione dei dati reali. Inoltre, essa potrà essere utilizzata per spiegare quantitativamente come le strutture, complesse e sepolte, vengono "tradotte" in immagine di resistività del sottosuolo, così da poter valutare in via preliminare i limiti delle prospezioni, evidenziare le capacità del metodo geoelettrico e dove ed in quali condizioni di sottosuolo esso può (o non può) fornire informazioni utili alla caratterizzazione delle sponde e dei rivestimenti spondali originali.

Alla luce di quanto sopra descritto risulterà cruciale ai fini del buon esito dell'applicazione dei metodi geofisici, ed in particolare geoelettrici, l'acquisizione in corrispondenza di manufatti di presenza e caratteristiche note allo scopo di taratura e calibrazione.

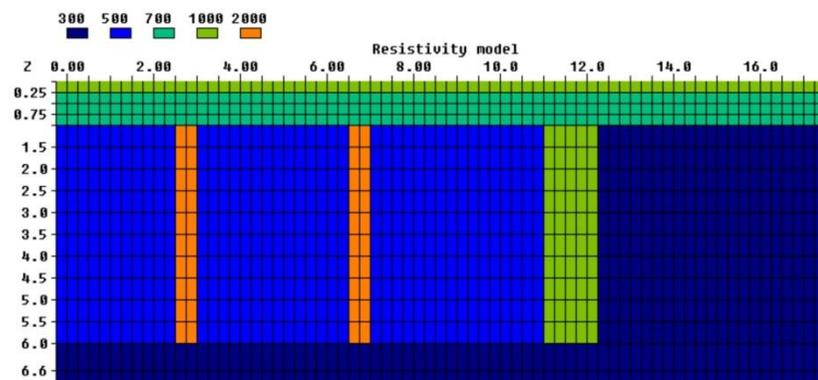
### WP-2: produzione lungo l'estensione dei Navigli

La seconda fase di lavoro (WP-2) è basata sullo studio di ulteriori BL. Essa verrebbe messa in opera solo in caso in cui i risultati ottenuti nella WP-1 siano tali da poter ragionevolmente discriminare, quantomeno nelle aree scelte come rappresentative, la presenza, lo spessore e la geometria dei manufatti.

In questa fase, a partire dalle posizioni dei BL pilota, la strategia di acquisizione ha carattere modulare, ovvero si procederà effettuando misure con il medesimo schema di acquisizione adottato in WP-1 ma all'interno di ulteriori BL posizionati lungo l'estensione dei

navigli. La posizione ed il numero dei BL saranno scelti in funzione del grado di dettaglio che si vorrà ottenere circa la variazione laterale dalle condizioni evidenziate nei BL pilota, ovvero per individuare situazioni anomale e locali, sconosciute o presunte. In via preliminare, si prevede che tale distanza potrà essere compresa tra 200 m e 300 m, ma potrà variare in funzione delle condizioni sito-specifiche.

In particolare, data la natura eterogenea dei materiali presenti nel sottosuolo, l'acquisizione di un numero ragionevole di BL all'interno di tratte del naviglio è mirata all'ottenimento di una massa critica di dati sperimentali che, in affiancamento alle misure effettuate allo scopo di taratura su strutture note e alla simulazione della struttura di sottosuolo descritta per il WP-1, sia tale da consentire di aumentare la probabilità di riconoscimento di differenti tipologie di materiale spondale e di riempimento.



**FIG. 4.3.6.3** Modello 2-d di sottosuolo utilizzato per la simulazione di una sezione tipo lungo il sito di via senato. I blocchi rappresentano le celle utilizzate dal codice alle differenze finite per simulare il campo di resistività apparente misurabile in tali condizioni.

### 4.3.7 | LIMITI DI APPLICAZIONE DEI METODI

Le principali limitazioni dei metodi geofisici applicabili al contesto specifico riguardano principalmente:

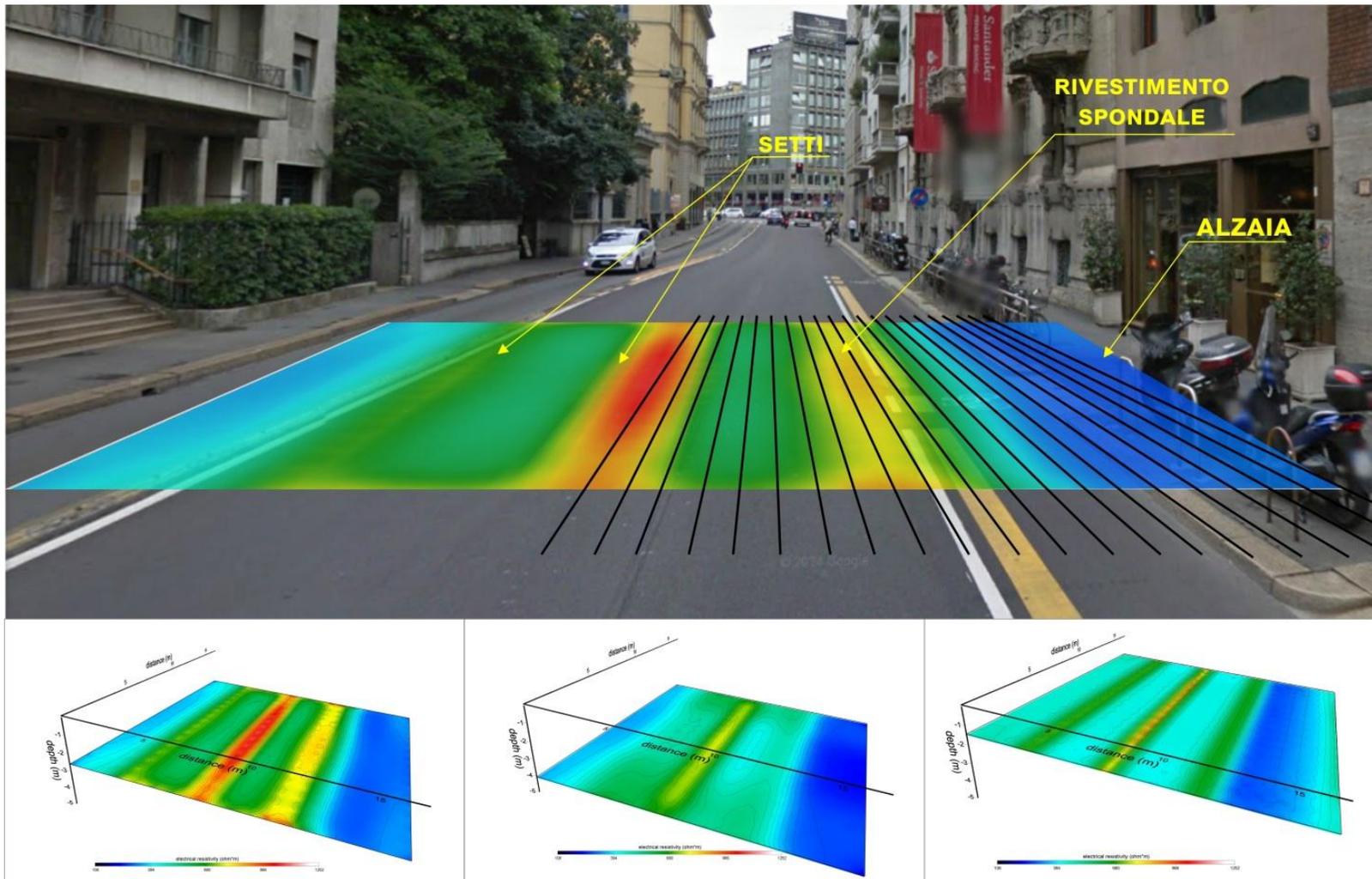
- la logistica sito-specifica riscontrabile nei siti in cui si andrà ad operare;
- le condizioni al contorno ed in profondità in cui i manufatti interesse si collocano.

Per quanto riguarda il primo aspetto, le condizioni sito-specifiche sfavorevoli consistono nella presenza di spazi di acquisizione limitati in direzione trasversale alla strada e potrebbero comportare una profondità di esplorazione limitata, soprattutto per quanto riguarda la prospezione geoelettrica, che di fatto limiterebbe la riconoscibilità e la tracciabilità delle anomalie associate alla strutture ricercate. Da questo punto di vista, l'acquisizione di profili di resistività longitudinali consentirebbe di avere lunghezze certamente superiori in modo da ottenere profondità di investigazione più grande (Fig. 4.3.6.1 e Fig. 4.3.7.1).

Per quanto riguarda la prospezione GPR, invece, uno dei fattore limitante è rappresentato dall'eterogeneità dei terreni più superficiali. Benché in situazioni urbane, ed in particolare nel contesto della città di Milano, siano presenti terreni generalmente eterogenei e grossolani, pertanto resistivi e dielettrici, di fatto la penetrazione dei segnali ed il riconoscimento degli echi riflessi profondi è limitata del *noise* elettromagnetico tipico dell'ambito urbano e dalla presenza di interferenze superficiali che, causando *scattering* degli impulsi, impediscono l'approfondimento del segnale stesso e la ricezione di echi riflessi profondi.

Per quanto riguarda il secondo aspetto, ovvero le condizioni in cui i manufatti si collocano in termini di profondità e di contrasto con strutture adiacenti, il fattore limitante è essenzialmente

rappresentato dallo spessore del materiale della sponda in funzione della profondità a cui si colloca. La valutazione di questo aspetto è cruciale ed è lo scopo principale della fase di valutazione al termine della WP-1 nel quale, in situazioni logisticamente differenti in condizioni di profondità e di spessori differenti selezionati sulla base di informazioni note a priori, dovrà essere effettuata una valutazione dei risultati ottenuti dai dati sperimentali in funzione dei risultati attesi al fine di poter programmare o piuttosto non procedere con la fase di produzione relativa al WP-2.



**FIG. 4.3.7.1**

Esempio di simulazione della distribuzione 3-d di resistività attesa ottenibile dalle sezioni longitudinali all'asse stradale (vedi il testo per i dettagli) nel sito di via Senato.

### 4.3.8 | VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI SUI MANUFATTI E SULL'AMBIENTE URBANO

Gli impatti delle prospezioni geofisiche sul sistema rappresentato dell'opera originale nella sua complessità ed estensione e dal contesto altamente antropizzato in cui essa si colloca possono essere classificati in due categorie, ovvero:

- impatti sui manufatti sepolti e superficiali, derivanti dalla stesa della strumentazione e dall'acquisizione delle misure;
- impatti sul traffico veicolare nelle aree di acquisizione delle misure.

Al fine di ridurre le interferenze con persone o cose, in via cautelativa le aree di indagine dovranno essere adeguatamente perimetrate e segnalate. Si dovrà inoltre provvedere all'ottenimento dei permessi per l'accesso alle aree di indagine e per la conseguente occupazione temporanea di suolo pubblico da parte della squadra operativa (composta da 3-4 tecnici specializzati) presso gli Enti preposti.

Per quanto riguarda la prima categoria, si sottolinea che l'acquisizione dei dati relativi alle prospezioni ERI e GPR è totalmente non invasiva, ovvero esse non arrecano danno e/o fonte di disturbo di alcun tipo a persone e/o animali e/o cose.

La prospezione ERI prevede infatti l'immissione di corrente elettrica a bassissima frequenza attraverso lo stendimento di una serie di cavi opportunamente schermati, collegati tramite morsetti ad una serie di picchetti metallici infissi nel terreno e connessi allo strumento di registrazione, il tutto nelle condizioni di massima sicurezza garantite dai produttori della strumentazione ai sensi delle normative vigenti e dal rispetto delle condizioni di applicazione ed utilizzo da parte degli operatori specializzati. Il solo aspetto della prospezione ERI a carattere invasivo, per quanto molto limitato,

consiste nell'utilizzo di elettrodi infissi nel terreno il cui accoppiamento è effettuato attraverso l'esecuzione di apposti fori con profondità massima pari a circa 15 cm. A tal fine, sulla base di recenti indicazioni applicative sviluppate nell'ambito della ricerca scientifica di base internazionale finalizzata alla diagnostica archeologica, nella fase WP-1 potranno essere sviluppati e testati appositi dispositivi di accoppiamento non invasivo al fine da ridurre al minimo tale impatto (Fig. 4.3.8.1).

La prospezione GPR prevede invece l'immissione nel terreno di impulsi elettromagnetici attraverso antenne direzionali opportunamente schermate che, semplicemente, vengono trascinate sul terreno e che producono un irraggiamento per gli operatori molto limitato e comunque nel rispetto delle normative vigenti in materia di trasmissione ed esposizione a campi elettromagnetici.

Per quanto riguarda gli impatti sul traffico veicolare nelle aree di acquisizione delle misure, di fatto consistono nella durata dell'acquisizione delle misure e nel posizionamento a terra della strumentazione. Per ciascun BL la durata delle acquisizioni è molto limitata ed è valutabile, in via preliminare, rispettivamente in 4-6 ore di lavoro per la prospezione geoelettrica e 1 ora per la prospezione GPR. Al fine di ridurre le interferenze con il traffico veicolare, comunque gestibile attraverso un'adeguata segnalazione e delimitazione delle aree di indagine e presenza di scorta da parte degli Enti competenti per la parzializzazione del traffico, le misure possono essere svolte nel periodo notturno. Considerazioni analoghe possono essere fatte per quanto riguarda l'acquisizione dei profili ERI trasversali alla strada, la cui acquisizione è valutata in circa 30 min – 45 min cadauno e per le quali l'utilizzo di apposite canaline passacavo consentirà di mettere in sicurezza la strumentazione e permetterà gli attraversamenti dei mezzi di trasporto nelle tratte lungo la carreggiata.



### 4.3.9 | VALUTAZIONE INDICATIVE DELLE TEMPISTICHE E DEI COSTI

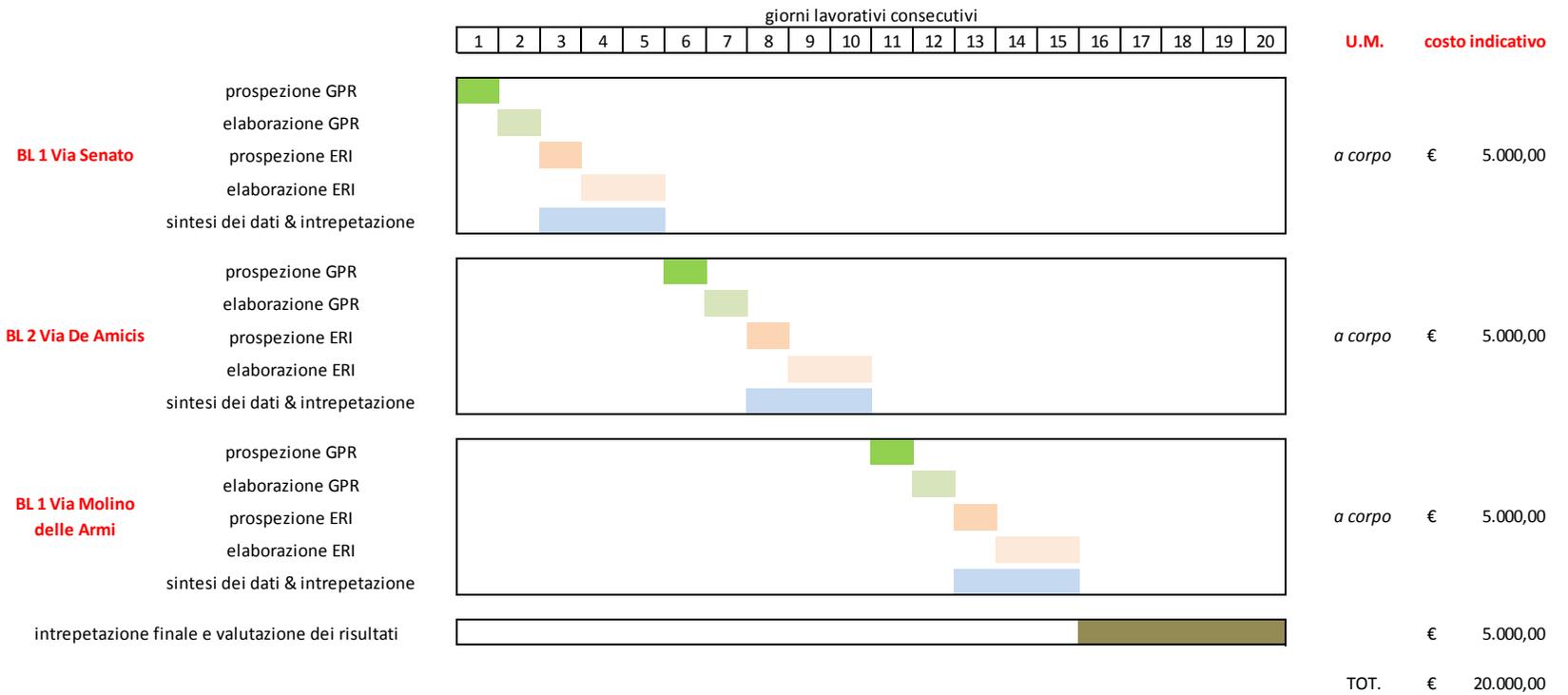
Nel seguito, attraverso il diagramma di Gantt semplificato proposto in Fig. 4.3.9.1 viene fornita un'indicazione preliminare di cronoprogramma (in giorni lavorativi consecutivi) relativo alla fase WP-1, descritta nel paragrafo 4.3.6 “Esempio di strategia di acquisizione dei dati e dei risultati attesi”, e considerando la presenza di una singola squadra operativa composta da una strumentazione ERI/GPR e da 3-4 tecnici specializzati.

In Fig. 4.3.9.1, viene inoltre fornita una valutazione dei costi delle attività sperimentali e concettuali descritte, nell'ottica di fornire un ordine di grandezza preliminare delle stesse basato su valori indicativi nell'ottica dei costi medi di mercato.

Le tempistiche ed i costi relativi alla fase modulare WP-2 sono le medesime di ciascuno dei tre BL pilota descritti nella fase WP-1.

**FIG. 4.3.8.1**

Esempio di accoppiamento tra gli elettrodi di misura ed il terreno tramite infissione (sopra) e con elettrodi di rame a base piatta (sotto; modificato da [10]).



**FIG. 4.3.9.1**

Diagramma di Gantt relativo all'acquisizione, all'elaborazione ed all'interpretazione dei dati relativi alla wp-1 nei tre siti pilota.

## 4.3.10 | CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente documento si inquadra nell'ambito dello "Studio di fattibilità per la riapertura dei Navigli milanesi" ed è volto alla descrizione di una metodologia di indagine preliminare di supporto alla progettazione basata sull'applicazione di tecniche prospezione geofisiche da superficie, il cui utilizzo è consolidato nell'ambito della diagnostica archeologica e nella ricerca scientifica di settore, al fine di far progredire lo stato delle conoscenze circa la profondità, l'estensione planimetrica, lo spessore, la tipologia di materiale costitutivo e lo stato di conservazione delle sponde, dei manufatti e dei rivestimenti spondali originali dei Navigli della cerchia interna, sepolti e conservati nel sottosuolo della città di Milano.

Attraverso la definizione di obiettivi generali e specifici, sia di metodo che sperimentali, il presente documento ha illustrato, nell'ottica di un quadro conoscitivo di carattere generale, la valutazione dei possibili scenari di applicazione delle prospezioni geofisiche per la caratterizzazione pre-scavo delle sponde, dei manufatti e dei rivestimenti spondali originali dei navigli, definendone le potenzialità ed i risultati attesi nelle migliori condizioni logistiche sito-specifiche ipotizzabili a priori e discutendone le incertezze, nonché valutandone gli impatti sulle attività umane e sui manufatti di interesse, le tempistiche di esecuzione ed i costi delle attività.

Da ultimo, data la complessità dei bersagli ricercati, lo spiccato carattere sperimentale della metodologia ed i risvolti possibili nell'ambito della ricerca di base, si suggerisce l'approvazione e la supervisione di un organismo scientifico sotto forma di dipartimento o istituto universitario con esperienza nel campo delle metodologie della ricerca archeologica comprovata da pubblicazioni scientifiche su riviste nazionali ed internazionali.

## Riferimenti bibliografici

### Paragrafo 4.2

CAP (1972), (Consorzio per l'Acqua potabile ai Comuni della provincia di Milano) Depauperamento delle risorse idriche sotterranee nel comprensorio della Brianza a Nord del Canale Villoresi

AA.VV. (1975) - "Indagine sulle zone umide in provincia di Milano", Vol. 2-I fontanili Provincia di Milano.

AIROLDI R., CASATI P., VIGANÒ P. (1976) - "La distribuzione e le variazioni della durezza delle acque nel sottosuolo di Milano". Geologia Tecnica, N. I.

VITTORIO MOTTA (1981) – L'acquedotto di Milano – Comune di Milano

Oggioni, G. Rosti, R. Venturelli, M. Bogani (1984).- Aspetti idrobiologici ed idrogeologici della valle del Ticino - Provincia di Milano

AA.VV. (1985) - "Il Canale Scolmatore delle piene a Nord-Ovest di Milano nel sistema drenante e irriguo della provincia di Milano". Provincia di Milano.

G. Oggioni, G. Rosti, A. Zacchetti (1985) - Aspetti idrogeologici dell'Est Milanese e tutela dell'Idroscalo- Provincia di Milano - Assessorato all'Ecologia-Provincia di Milano.

AA.VV. (1989) - "Indagine sulla qualità delle acque nella provincia di Milano".

AIROLDI R., CASATI P., (1989) Le falde idriche del sottosuolo di Milano. Comune di Milano

AA.VV. (1989) "Nitrati in falda 1988". Provincia di Milano.

AA.VV. (1990) - "Indagine sulla qualità delle acque nella provincia di Milano-aggiornamento al 1989." Assessorato all'Ambiente-Provincia di Milano.

AA.VV. (1992) "Oscillazioni piezometriche registrate nei pozzi della rete di rilevamento regionale negli anni 1987-1991" S.I.F. - Provincia di Milano.

AA.VV. (1992) - "Rete di rilevamento regionale dei corpi idrici sotterranei-1991". S.I.F. Provincia di Milano.

AA.VV. (1992) - "Indagini sulla presenza di composti organo-alogenati nelle acque di falda della Provincia di Milano". S.I.F. - Provincia di Milano.

AA.VV. (1993) - "Catasto pozzi privati 1992-Prima Bozza" Provincia di Milano. AA.VV. (1992) - "Catasto pozzi pubblici 1991". S.I.F. - Provincia di Milano.

AA.VV. (1995) Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano Vol.I. Provincia di Milano.

AA.VV (1996) Valutazioni sull'innalzamento della falda nella città di Milano nei primi anni '90- Provincia di Milano- Ottobre 1996

AA.VV – (1999) - Indagine sulla qualità delle acque superficiali nella Provincia di Milano- Provincia di Milano

AA.VV- (2008) – Scenari di qualità ambientale nel sistema di depurazione di Milano – Comune di Milano

La cartografia utilizzata i dati e le elaborazioni piezometriche sono state estratte dal Sistema Informativo Ambientale (SIA) curato e

gestito dalla Provincia di Milano e da Metropolitana Milanese che gestisce il Sistema Idrico Integrato della Città di Milano.

### **Paragrafo 4.3**

[1] Reynolds, J.M., 2011. “An Introduction to Applied and Environmental Geophysics”. Wiley- Blackwell

[2] Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E.,1990. Applied geophysics, 2nd edition. Cambridge University Press, New York, NY

[3] Campana S., Piro S., 2008. Seeing the Unseen. Geophysics and Landscape Archaeology, CRC Press, 376 pag, ISBN 9780415447218

[4] Boschi F., 2009. Introduzione alla geofisica per l'archeologia. In: Enrico Giorgi (ed.). Groma 2. In profondità senza scavare 10.978.88904294/08.

[5] Kvamme K. L., 2006. Integrating Multidimensional Geophysical Data, Archaeological Prospection, 13, 57–72. DOI: 10.1002/arp.268

[6] Piro, S. 2007. “Archaeogeophysics”, Near Surface Geophysics 5 (6), pp 347-348

[7] Mele M., Cremaschi M., Giudici M., Lozej A., Pizzi C, Bassi A., 2013. The Terramare and the surrounding hydraulic structures: a geophysical survey of the Santa Rosa site at Poviglio (Bronze Age, northern Italy). Journal of Archaeological Science, 40, 4648-4662. DOI: 0.1016/j.jas.2013.06.033

[8] Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O., Wilkinson, P.B. 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. Journal of Applied Geophysics 95, 135-156. doi: 10.1016/j.jappgeo.2013.02.017

[9] Daniels, D.J.. Ground Penetrating Radar, 2nd edition, IET

[10] Tsokas G. N., Tsourlos P. I., Vargemezis G., Novack, M., 2008. Non-destructive Electrical Resistivity Tomography for Indoor Investigation: the Case of Kapnikarea Church in Athens. Archaeological Prospection, 15, 47–61. DOI: 10.1002/arp.321

[11] Sezione caratteristica - Progetto sistemazione dell'ex alveo della fossa interna, Tav.7 Ufficio Tecnico del Comune di Milano

[12] Sezione schematica con indicazione dei riempimenti - M. Brown