

# PASSANTE FERROVIARIO DI TORINO TRA LE STAZIONI DI PORTA SUSA E STURA SOTTOATTRAVERSAMENTO DEL FIUME DORA

Ing. Valter Capata<sup>1</sup>, Ing. Andrea Danese<sup>2</sup>, Ing. Paolo Maria Zanetti<sup>3</sup>

<sup>1</sup> S.G.S. S.r.l.

<sup>2</sup> ASTALDI S.p.A.

<sup>3</sup> SEICO S.r.l. Servizi di Ingegneria e Consulenza

## SOMMARIO

La memoria illustra il progetto ferroviario del sottoattraversamento del fiume Dora che si inserisce nella realizzazione del complesso infrastrutturale del Nodo di Torino, consentendo il recupero di estese aree urbane per una riqualificazione ambientale, proprio nel cuore della città, con l'insediamento di un grande asse attrezzato.

## SUMMARY

The memorial explains the Dora under – river tunnel project, connecting the implementation of the infrastructural plant of the Turin's railway's junction, allowing the salvage of huge urban areas, heart of the town, with the settlement of a large equipped axle.

## 1. PREMESSA

Il sottoattraversamento del fiume Dora si inserisce nel quadro degli interventi previsti per la sistemazione e la razionalizzazione del "Nodo Ferroviario di Torino" (Fig. 1).

La nuova linea ferroviaria, tra le stazioni di TO-Lingotto e TO-Porta Susa, ed il quadruplicamento dei binari, tra le stazioni di TO-Porta Susa e TO-Stura, comporta la realizzazione di un importante complesso infrastrutturale volto anche ad ottenere un radicale miglioramento del sistema viario di superficie.

Lo scopo principale dell'intervento è infatti quello dello spostamento, in galleria artificiale, del traffico ferroviario lento da e per Milano, della linea Modane e delle linee A.V., mediante l'abbassamento delle livellette e successivo ritombamento.

La sede dei vecchi binari si rende quindi disponibile per l'insediamento di una grande arteria stradale di superficie ("spina") parallela al tracciato ferroviario sottostante.

Lo studio della nuova livelletta ferroviaria ha suggerito, in corrispondenza dell'interferenza con il fiume Dora, il passaggio subalveo al fine di minimizzare l'impatto di carattere ambientale consentendo, alla spina stradale superiore, l'attraversamento del fiume con andamento altimetrico uniforme.

La necessità di garantire, durante l'esecuzione dell'opera, il deflusso della portata del fiume ha comportato la parzializzazione delle fasi di lavoro con le necessarie opere di difesa e impermeabilizzazione sia in fase provvisoria che definitiva.

La sezione di passaggio dei binari è costituita da uno scatolare realizzato all'interno di paratie strutturali.

Le paratie strutturali sono delimitate, esternamente, da paratie plastiche debolmente armate sormontate da una soletta superiore di protezione costituente, nel tratto interessato dall'attraversamento, il fondo alveo.

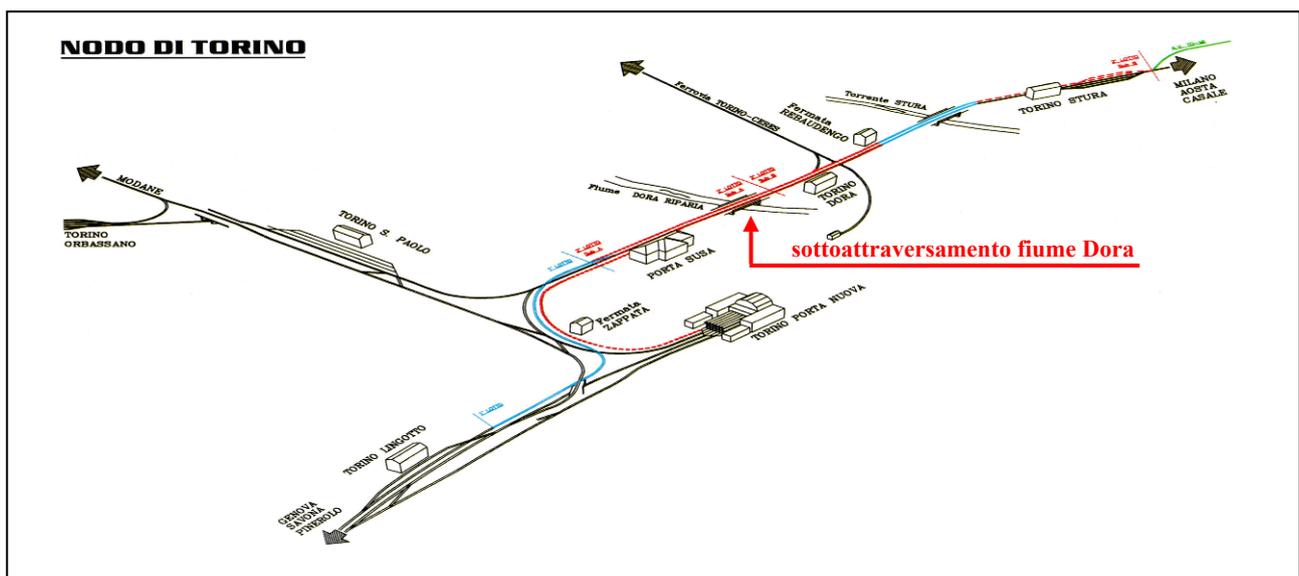


Fig. 1 – Nodo ferroviario di Torino

## 2. TRACCIATO E CARATTERISTICHE DELLA LINEA

Il tracciato della linea ferroviaria si sviluppa in un contesto urbano interessato, oltre che dalla presenza del fiume Dora, da una complessa viabilità di superficie in zone intensamente antropizzate.

Partendo dalla stazione di Porta Susa, con livelletta orizzontale, il tracciato ferroviario si sviluppa al disotto del tessuto urbano con pendenza del 12‰ circa, sottopassando la viabilità di Piazza Statuto, dove interseca la linea 1 della metropolitana, Via Avet, Via Miglietti, l'importante nodo di Corso Regina Margherita e Via Don Bosco, per immergersi, infine, sotto il fiume Dora.

Sottopassato il fiume Dora (fig. 2) con una struttura scatolare racchiusa tra una serie di paratie strutturali e paratie plastiche, si arriva alla "Fermata di Dora", a valle della quale la livelletta risale con pendenza di circa il 14‰, verso Corso Grosseto, sottopassando Via Stradella e Via Breglio prima di arrivare alla Stazione di Rebaudengo.

Le opere ferroviarie di linea sono costituite essenzialmente da gallerie artificiali a singolo, doppio o triplice "fornice" su uno o due livelli, di cui i binari occupano sempre quello inferiore.

Dovendo garantire l'esercizio delle linee ferroviarie, le opere sono state suddivise in due macrofasi, realizzando prima la macrofase ovest, con il traffico ferroviario ancora in superficie e concentrato tutto nella zona est dell'intervento, in modo da rendere disponibili le aree ovest per la realizzazione delle gallerie.

Ultimata la macrofase ovest, il traffico viene instradato in galleria rendendo disponibili le aree est per il completamento del passante ferroviario.

## 3. QUADRO IDROGEOMORFOLOGICO

I terreni interessati dalle opere sono costituiti prevalentemente da una formazione a componente ghiaiosa in matrice sabbioso-limosa fino ad una profondità di circa 11.00 m da fondo alveo (q. 224.17 s.l.m.), e successivamente da un banco di sabbia e sabbie limose, con intercalate lenti di limo più o meno sovraconsolidato, aventi ottime caratteristiche meccaniche (tab. 1).

Il livello di massima falda di progetto è stato fissato alla q.ta di 229.00 s.l.m.

TAB. 1 - CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI TERRENI

Terreno tipo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$K_a$	$K_p$	$K_o$
Ghiaie sabbio-limose	20	38	10	0.238	4.204	0.384
Sabbie e sabbie limose	20	35	10	0.271	3.69	0.426

Il valore della coesione, indicato nella tabella, è stato preso in considerazione solo nelle analisi strutturali in fase provvisoria mentre, a lungo termine, il suo contributo è stato trascurato.

Il notevole battente d'acqua, che nelle condizioni più critiche è di circa 17 m rispetto al fondo scavo, ha richiesto il consolidamento del terreno al piede delle paratie con la tecnica del jet-grouting, per assicurarne la stabilità e anche per minimizzare i risentimenti dello scavo nell'area circostante.

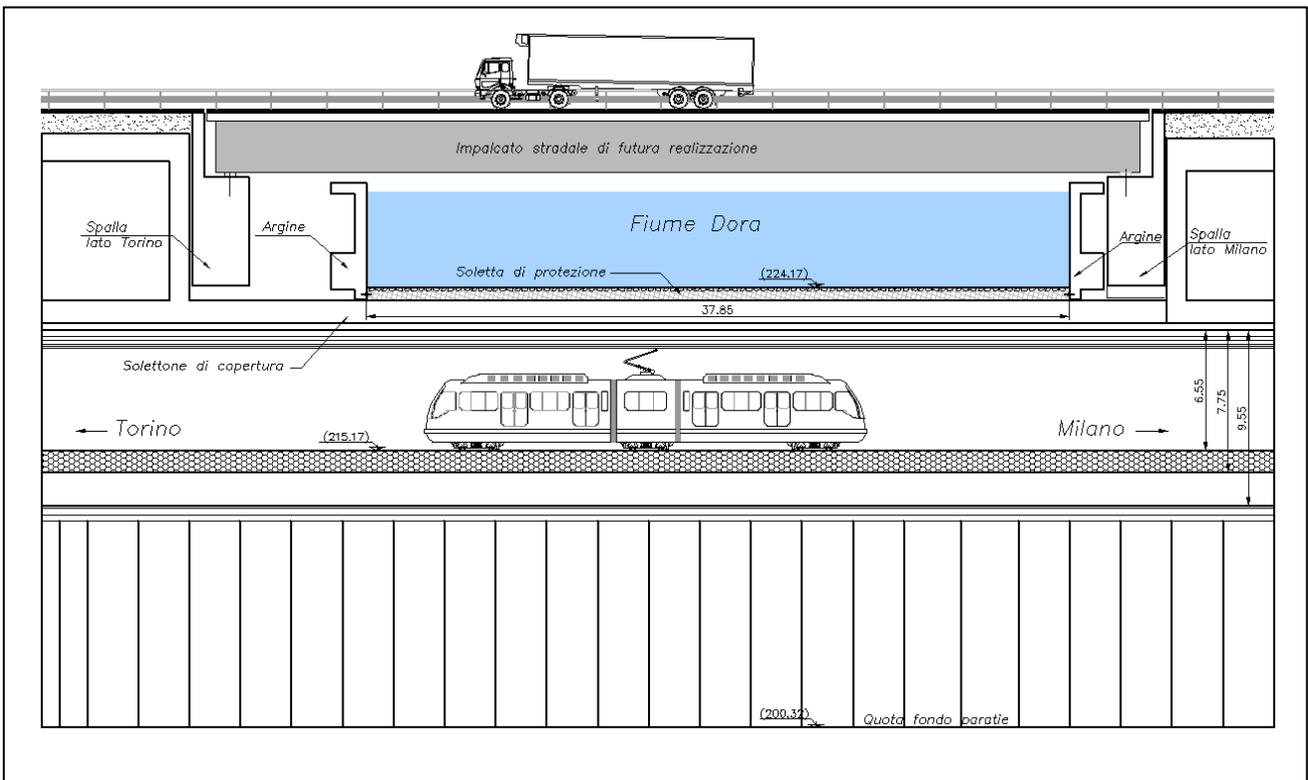


Fig. 2 - Sezione longitudinale del sottoattraversamento

#### 4. DESCRIZIONE DELL'OPERA

In corrispondenza dell'attraversamento del fiume Dora, i binari della linea lenta e i binari della linea veloce (A.V.) si biforcano per consentire il loro alloggiamento in due manufatti distinti ancorché uguali. Il primo è stato realizzato durante la macrofase ovest ed il secondo è in fase di realizzazione nell'ambito della macrofase est.

Ogni manufatto è costituito da (fig. 3):

- paratie plastiche esterne debolmente armate, aventi spessore di 1.00 m e lunghezza di 18.00 m, che costituiscono, unitamente al jet-grouting di fondo, uno scudo di protezione per le lavorazioni interne;
- paratie strutturali, aventi spessore di 1.00 m e lunghezza di 22.00 m, collegate in testa da un solettone in c.a., con spessore di 1.20 m, a costituire un portale che consente lo scavo in galleria artificiale per le successive lavorazioni e, in fase finale, collabora alla resistenza strutturale nei confronti delle azioni di progetto;
- manufatto scatolare (figg. 4, 5) che alloggia i binari, realizzato all'interno del portale sopra citato con scavo sotto copertura, costituito da un solettone di fondo con spessore di 1.80 m, piedritti con spessore di 1.00 m, e soletta di copertura, con intradosso ad arco circolare, avente spessore variabile tra 0.60 m e 1.94 m;
- soletta superiore di protezione del fondo alveo, avente spessore di 0.65 m, con finitura, all'estradosso, di pietrame a pezzatura massima di 30 cm.

L'estradosso della soletta di protezione è a q. 224.17 s.l.m., la quota di massima falda è 229.00 s.l.m. con battente idraulico massimo, quindi, di circa 5 m.

Il piano ferro è a q. 215.17 s.l.m. con altezza libera, alla chiave dell'arco, di 6.55 m.

Una serie di paratie a coltello, seminate al di fuori dell'impronta planimetrica dei manufatti ferroviari, costituisce la fondazione profonda delle spalle del ponte stradale della "spina" che sovrappassa il fiume.

L'impalcato stradale superiore è in fase di definizione progettuale e sarà oggetto di un nuovo appalto.

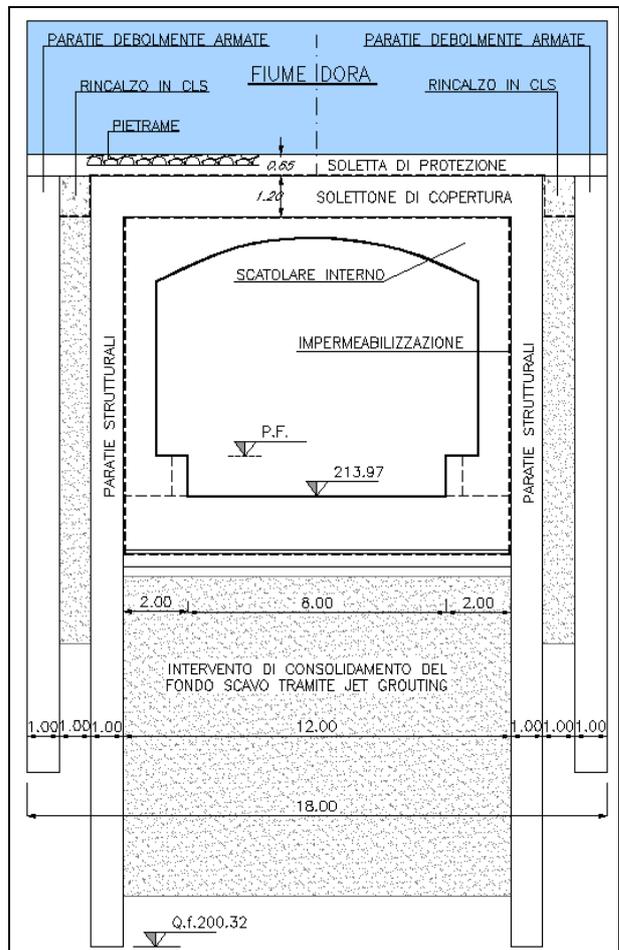


Fig. 3 – Sezione trasversale del sottoattraversamento

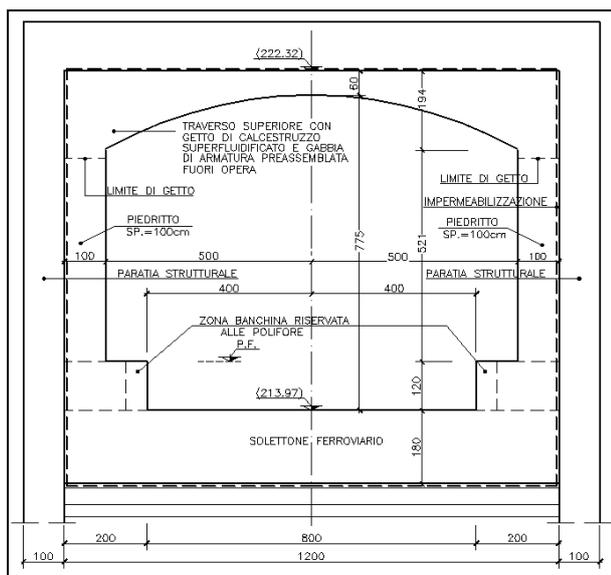


Fig. 4 – Sezione trasversale scatolare - carpenteria

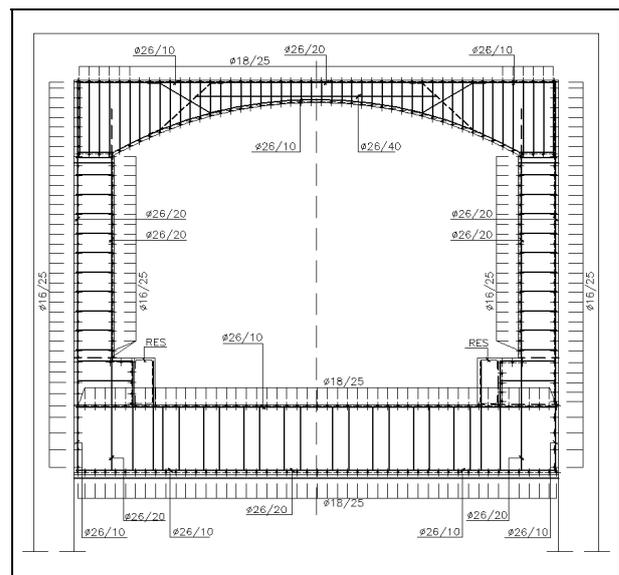


Fig. 5 – Sezione trasversale scatolare - armatura



Fig. 6 – Ipotesi di impalcato stradale

Nella fig. 6 la struttura portante dell'impalcato stradale è ipotizzata ad "arco superiore strallato".

L'esigenza di operare in condizioni di massima sicurezza, al disotto dell'alveo del fiume, ha suggerito la realizzazione di opere in grado di garantire un'alta protezione "stagna" dell'area di cantiere.

Sono state eseguite sia paratie plastiche sia colonne di jet grouting affiancate. Per queste ultime, grazie ai risultati di appositi campi prova, si sono potute raggiungere buone ottimizzazioni circa i parametri che influenzano il trattamento.

Al fine di ridurre la profondità di infissione delle colonne in jet-grouting, le elevate sottopressioni idrauliche sono state in parte controbilanciate con pali in calcestruzzo, armati a trazione, semplicemente connessi per attrito al tappo di fondo.

L'intervento, come riportato nella sezione trasversale del sottoattraversamento, ha riguardato sia il terreno compreso tra i diaframmi strutturali e quelli plastici sia quello al disotto del solettone di fondo. Durante la realizzazione dei trattamenti colonnari sono state attuate diverse procedure di controllo a partire innanzitutto dal sistema di posizionamento della macchina perforatrice.

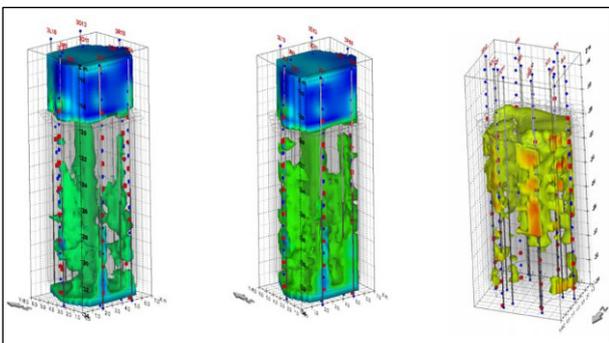


Fig. 8 – Tomografie sismiche

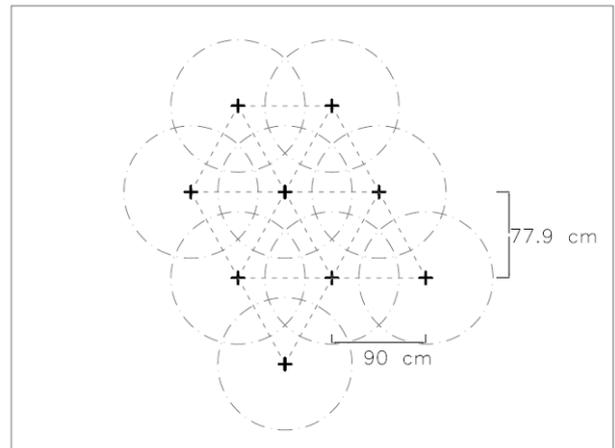


Fig. 7 – Maglia delle colonne di jet-grouting

φ UGELLO (mm)	RISALITA S	PASSO DI RISALITA (cm)	ROTAZIONE (RPM)	PRESSIONE MALTA (BAR)	PRESSIONE ARIA (BAR)	PORTATA (L/MIN)	A/C
4	7	4	16/21	420/450	6/8	180	1

PARAMETRI DI PERFORAZIONE

Sulla macchina sono stati infatti montati sistemi di rilevamento GPS grazie ai quali si sono potuti pressochè eliminare gli errori di tracciamento e di verticalità. Quindi è stata predisposta l'automazione e la registrazione dei parametri di iniezione (quantitativi della miscela, pressioni, velocità ecc.).

Nella fig. 7 è riportato lo schema del trattamento colonnare con diametro teorico delle colonne di 1350 mm e maglia triangolare con base di 90 cm e altezza di 77.9 cm.

Il trattamento è stato controllato mediante semplici carotaggi e indagini indirette quali tomografie sismiche bi e tri-dimensionali (fig. 8). Il risultato ottenuto è stato molto soddisfacente essendosi potute eseguire le delicate operazioni di scavo e getto dei rivestimenti interni praticamente all'asciutto in assenza di qualsiasi infiltrazione d'acqua.

Lo scatolare interno risulta completamente protetto da un sistema impermeabilizzante costituito da (fig. 9):

- strato di geotessile avente spessore di 3 mm con massa areica di 500 g/m<sup>2</sup>;
- due membrane in poliolefine di spessore di 2 mm con massa areica di 1.8 Kg/m<sup>2</sup>.

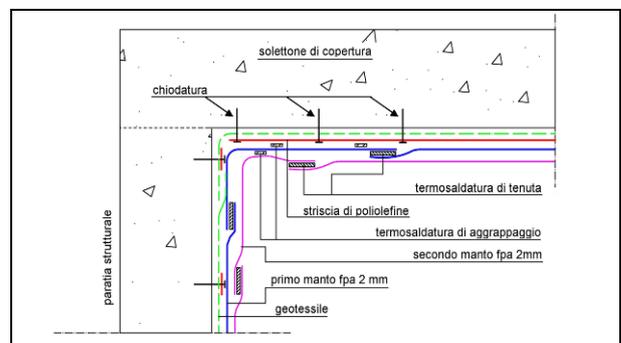


Fig. 9 – Sistema di impermeabilizzazione

## 5. FASI REALIZZATIVE

Si illustrano le fasi di lavoro della macrofase ovest già realizzata; lo stesso procedimento è in atto per la macrofase est in corso di realizzazione.

La costruzione della galleria per il sottoattraversamento dell'alveo è stata preceduta, come già in parte descritto, da una serie di opere propedeutiche finalizzate alla sicurezza generale delle aree di cantiere nei confronti delle infiltrazioni di acqua in corrispondenza del piano di lavoro.



Fig. 10 – Demolizione della tombinatura del Fiume Dora

Tutte le lavorazioni sono state possibili grazie alla parzializzazione dell'alveo, ovvero restringendo la sezione idrica del Fiume Dora mediante la realizzazione di due isole: la prima lato Torino e la seconda, successiva alla demolizione della prima, lato Milano.

Le fasi di lavoro, in ordine cronologico, sono state:

- demolizione della vecchia tombinatura in cemento armato del fiume (fig. 10);
- realizzazione del piano di lavoro lato Torino mediante la costruzione della prima isola (figg. 11, 12);
- esecuzione, dall'isola lato Torino, delle paratie di linea e di quelle plastiche nonché del jet grouting sia esterno che interno ai pannelli di linea (fig. 13);
- getto del solettone di copertura e della soletta di protezione;

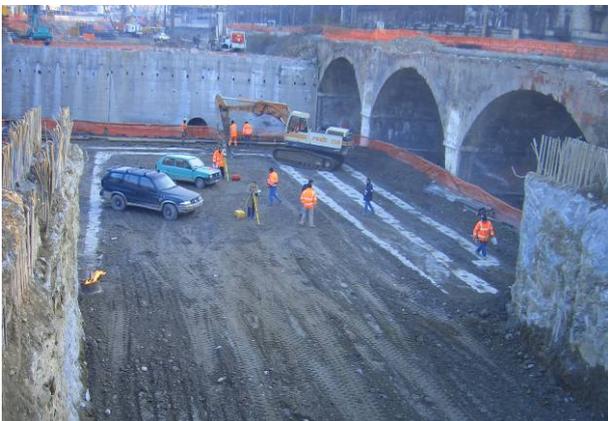


Fig. 11 – Costruzione dell'isola lato Torino

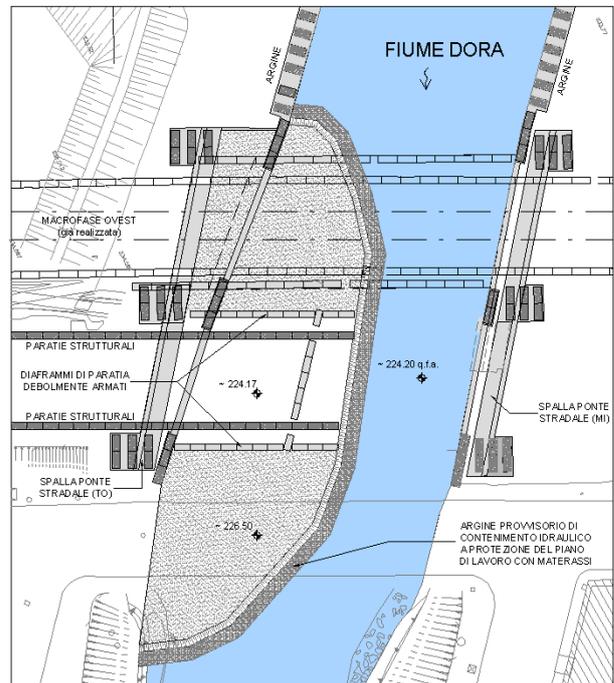


Fig. 12 – Pianta isola di lavoro lato Torino

- realizzazione dello scatolare interno;
- realizzazione delle fondazioni del futuro ponte stradale e nuovo argine del fiume;
- smantellamento dell'isola lato Torino;
- realizzazione del piano di lavoro lato Milano mediante la costruzione della seconda isola;
- completamento, lato Milano, delle paratie plastiche, di quelle di linea e del tappo di fondo;
- getto del solettone di copertura e della soletta di protezione;
- realizzazione dello scatolare interno;
- realizzazione delle fondazioni del futuro ponte stradale e nuovo argine del fiume;
- smantellamento dell'isola lato Milano.



Fig. 13 – Lavorazioni dell'isola lato Torino

Terminata, per ogni fase, la realizzazione delle opere di contenimento della galleria artificiale, si è potuto procedere allo scavo, sotto copertura, del terreno compreso tra le paratie fino al raggiungimento del piano di posa dello scatolare interno.

La necessità di realizzare lo scatolare interno sotto copertura ha comportato uno studio di ottimizzazione sia della geometria del manufatto che delle fasi di lavorazione nonché della scelta dei materiali.

Si è optato per una geometria del traverso superiore con intradosso a segmento circolare per migliorare la posa in opera della gabbia di armatura e il getto del calcestruzzo.

Eseguito lo scavo e stesa l'impermeabilizzazione, è stato realizzato il solettone di fondo e sono stati gettati i piedritti fino all'imposta del traverso superiore facendo fuoriuscire dal getto solo l'armatura di attesa controterra (in trazione) e predisponendo, per l'armatura in compressione, appositi manicotti filettati.

La presenza di armatura sul lato interno del piedritto, non avrebbe infatti consentito la messa in opera della gabbia preassemblata del traverso superiore.

Realizzati i piedritti e completata l'impermeabilizzazione, è stata sollevata e allocata la gabbia preassemblata mediante apposita centina reticolare mobile (fig. 14).

Sono stati quindi disposti i ferri ripartitori longitudinali per il collegamento con i conci limitrofi e sono state avvitate le barre filettate ai manicotti predisposti in compressione sulla testa dei piedritti.

È stata infine disposta una serie di centine metalliche a sostegno del cassero (fig. 15) e si è pompato calcestruzzo superfluidificato per garantire che il getto suborizzontale fornisca le caratteristiche di resistenza e durabilità richieste.

Le centine metalliche risultano munite, in chiave, di un meccanismo telescopico che ne consente la movimentazione per l'avanzamento e il getto in sequenza dei vari conci.

Le centine sono disposte ad interasse di 75 cm; ogni concio ha una lunghezza di 6.00 m con un peso della gabbia preassemblata di circa 10.000 Kg.



*Fig. 14 – Sollevamento gabbia preassemblata*



*Fig. 15 – Centine a sostegno del cassero dello scatolare*

## 6. ANALISI STRUTTURALI

Per la valutazione delle sollecitazioni nelle strutture sono stati utilizzati due programmi di calcolo, uno alle differenze finite e l'altro agli elementi finiti, così da verificare lo stato di sollecitazione e deformazione per tutte le fasi esecutive ritenute più gravose.

Con il primo programma sono state valutate le sollecitazioni e deformazioni nelle sole paratie, durante le fasi di scavo, schematizzando i solettoni orizzontali come vincoli passivi che impediscono alle strutture di spostarsi in direzione orizzontale.

Con il secondo programma è stata esaminata la configurazione finale al termine delle lavorazioni. Sono stati implementati due modelli di calcolo: il primo (modello 1) in cui si esamina il comportamento d'insieme di tutte le strutture che formano la galleria, il secondo (modello 2) in cui è stato studiato il comportamento dello scatolare interno sollecitato dalla sola spinta dell'acqua nel caso si instauri, per infiltrazione a lungo termine, il regime di massimo battente idraulico.

Il programma alle differenze finite, per la fase provvisoria, si basa sull'equazione differenziale della linea elastica delle travi su suolo elastico.

Il legame costitutivo sforzi-deformazioni delle molle che schematizzano il terreno risulta definito da una funzione bilaterale, a sua volta regolata dalla costante di Winkler e dalle tensioni orizzontali relative agli stati limite attivo e passivo di Rankine.

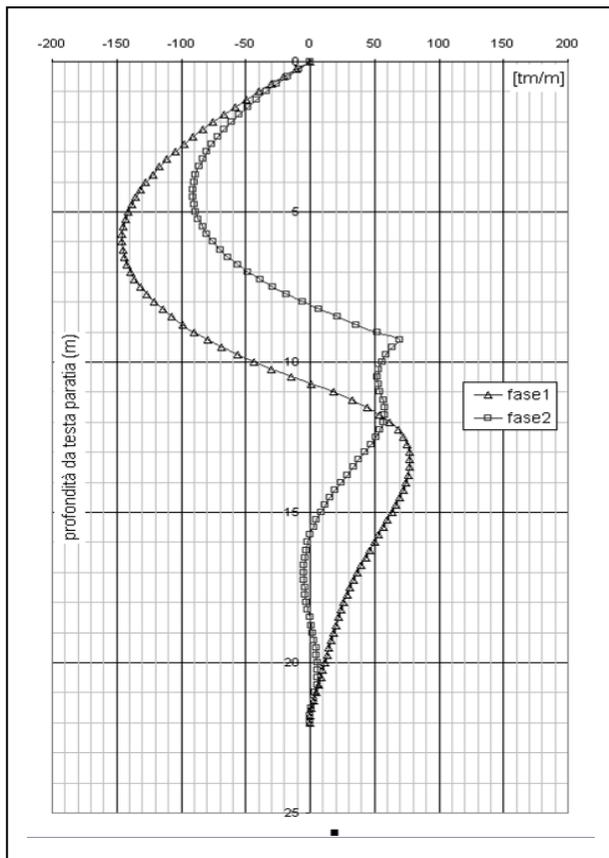


Fig. 16 - Momenti flettenti paratie (fase provvisoria)

In pratica a partire da una condizione di spinta in quiete ( $\sigma'_{ho} = K_o \times \sigma'_v$ ) la struttura, discretizzata in n elementi, raggiunge l'equilibrio, dopo varie interazioni, in modo congruente con le azioni e reazioni che il terreno può esplicare, secondo la schematizzazione adottata.

Una volta raggiunta la condizione di equilibrio è possibile confrontare l'effettivo stato di resistenza mobilitata con il valore ultimo passivo disponibile.

Tale rapporto definisce il grado di sicurezza rispetto ad una rottura rigido-plastica dell'insieme opera-terreno.

Nella fig. 16 è riportato il diagramma dei momenti per la fase 1, corrispondente al raggiungimento del fondo scavo massimo, e per la fase 2 con l'esecuzione del solettone di fondo e l'adozione di spinte a riposo del terreno ( $K_o$ ).

Nelle figure 17 e 18 sono riportati lo schema di calcolo e il diagramma dei momenti per il modello 1 che analizza, nella fase finale, la struttura nel suo complesso utilizzando il programma di calcolo agli elementi finiti SAP2000.

Lo scatolare interno e il portale esterno, costituito dalle paratie strutturali e dal solettone di copertura con esse in continuità, sono stati simulati con elementi "frame"; il collegamento tra le due strutture, gettate a contatto, è stato simulato mediante bielle reagenti solo a compressione.

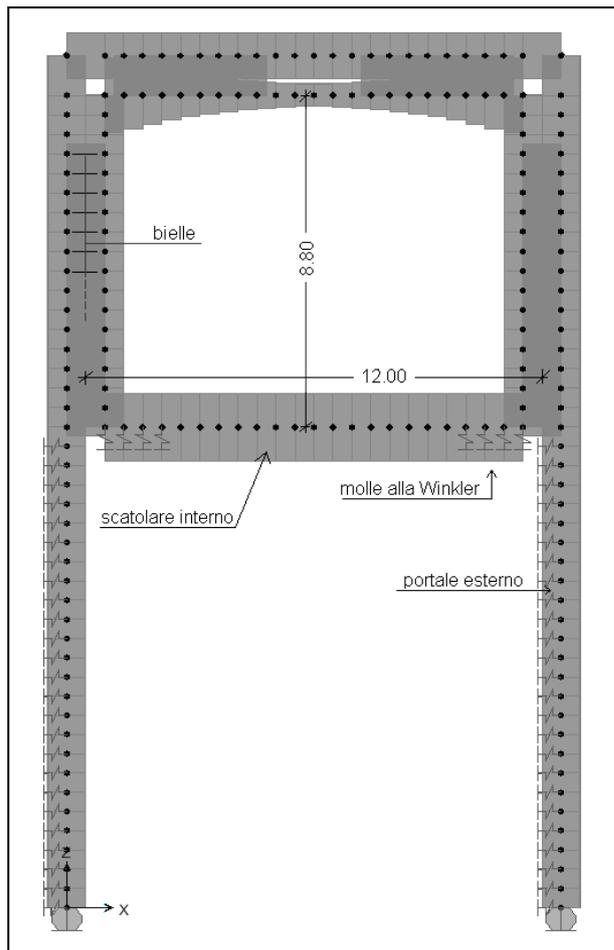


Fig. 17 - Schema di calcolo del modello 1

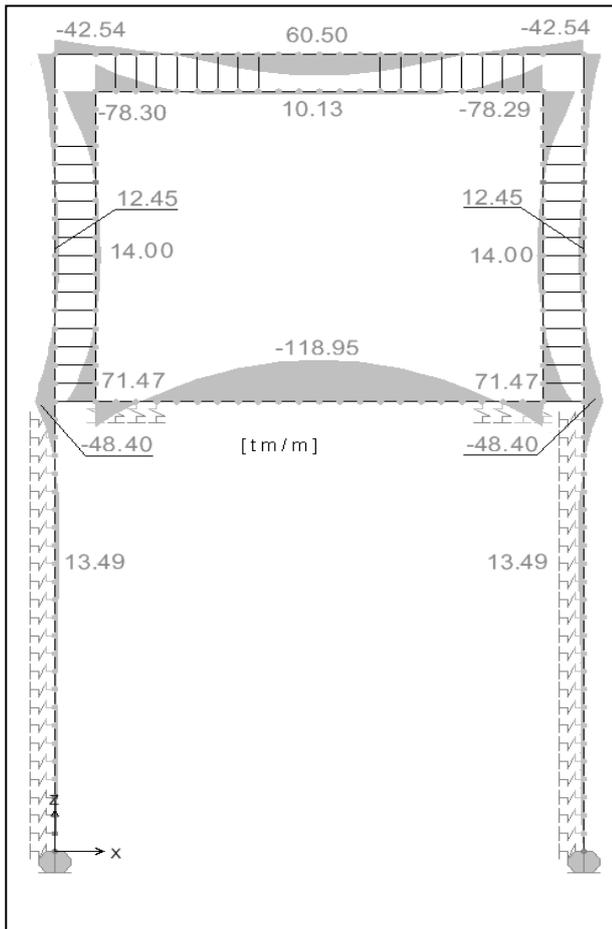


Fig. 18 – Momenti flettenti nelle strutture (fase finale)

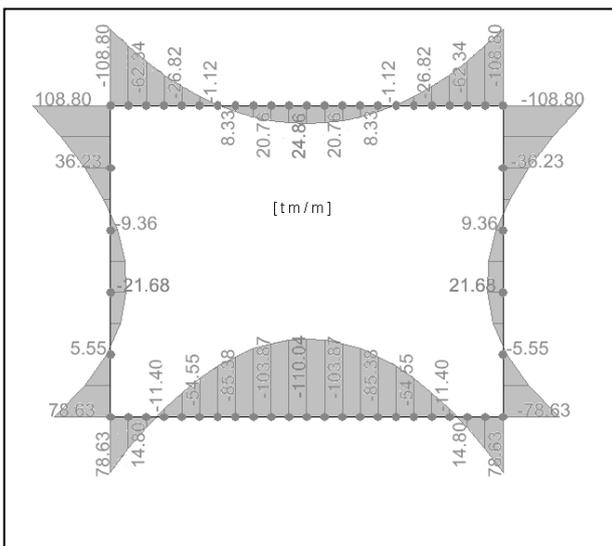


Fig. 19 – Momenti flettenti nel modello 2

Lo scatolare interno poggia sul terreno tramite molle alla Winkler alle quali è stato assegnato, stanti le ottime caratteristiche meccaniche ottenute con il consolidamento di jet-grouting, un modulo di reazione  $K = 10000 \text{ t/m}^3$ .

Nel procedimento iterativo di calcolo, sono state eliminate le molle risultanti in trazione.

Nella fig. 19 è riportato il diagramma dei momenti per il modello 2 che analizza il solo scatolare interno utilizzando ancora il programma di calcolo agli elementi finiti SAP2000.

Lo scatolare è sottoposto, al contorno, alle spinte e sottospinte dovute al massimo battente idraulico di progetto.

I valori massimi di sollecitazione flettente tra il modello 1 (118.95 tm) e il modello 2 (110.04 tm) differiscono del 7% circa a conferma della validità degli schemi adottati.

Le sollecitazioni nelle paratie del modello alle “differenze finite” risultano invece nettamente superiori a quelle del modello 1 in quanto, in fase provvisoria, lo scatolare interno non è stato ancora realizzato e non collabora quindi alla resistenza strutturale dell’insieme.

In base all’involuppo delle sollecitazioni rinvenute nelle varie fasi e con i vari programmi di calcolo e modelli, sono stati dimensionati tutti gli elementi strutturali con le seguenti incidenze di armatura:

PARTE D’OPERA		INCIDENZA (dN/mc)
SCATOLARE INTERNO	TRAVERSO INFERIORE	80
	PIEDRITTI	110
	TRAVERSO SUPERIORE	120
PARATIE STRUTTURALI		230
SOLETTONE DI COPERTURA		100

\*\*\*\*\*

Committente delle opere è la S.p.A. Rete Ferroviaria Italiana.

La Direzione Lavori è a cura di ITALFERR nella persona dell’Ing. G.M. Cavallero (macrofase ovest) e dell’Ing. P. Cuppone (macrofase est).

La realizzazione è a cura dell’ATI con ASTALDI S.p.A. Capogruppo mandataria sotto la direzione tecnica dell’ing. A. Danese.

Il progetto strutturale di dettaglio è sviluppato dalla SEICO S.r.l. a cura dell’ing. P.M. Zanetti.

Il progetto geotecnico di dettaglio è sviluppato dalla S.G.S. S.r.l. a cura dell’ing. V. Capata.

\*\*\*\*\*