STAZIONE S. GIOVANNI DELLA METROPOLITANA DI ROMA - LINEA C: LE PRINCIPALI TEMATICHE PROGETTUALI E L'UTILIZZO DELLE TRAVI PREM

ELIANO ROMANI, Metro C
FRANCESCO MARIA ROTUNDI, Metro C
MANUELA CONTALDO, Engroup Engineering
LIVIO IZZO, Assoprem

SUMMARY

PREM beams have been inserted in the project of the San Giovanni Station of Rome's Line C Underground in order to limit time of construction, avoid, during archaeological excavations, the use of metal struts to contrast the diaphragm walls, subject to earth and adjacent buildings pressure, and to limit the thickness of the concrete slabs to position the technical installations.

The article describes the design of the San Giovanni station, detailing the structural characteristic of PREM beams and the use in the different phases of construction.

1. PREMESSA

La Linea C è la terza metropolitana di Roma che, una volta completamente realizzata, attraverserà la città da nord-ovest a sud-est, quasi raddoppiando lo sviluppo della rete metropolitana attualmente esistente.

Metro C ScpA è il General Contractor, costituito da Astaldi (mandataria), Vianini Lavori, Ansaldo STS e CMB che si occupa della realizzazione della Linea C in tutte le sue fasi: dalla progettazione alle indagini archeologiche, dalla costruzione delle gallerie alle stazioni e ai treni, sino allo start up.

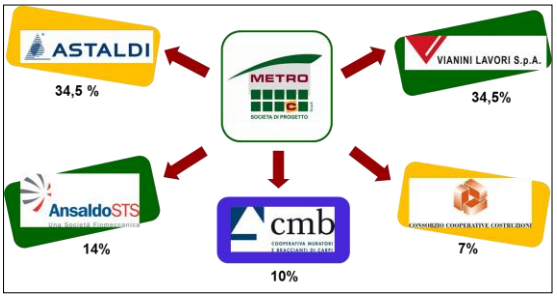
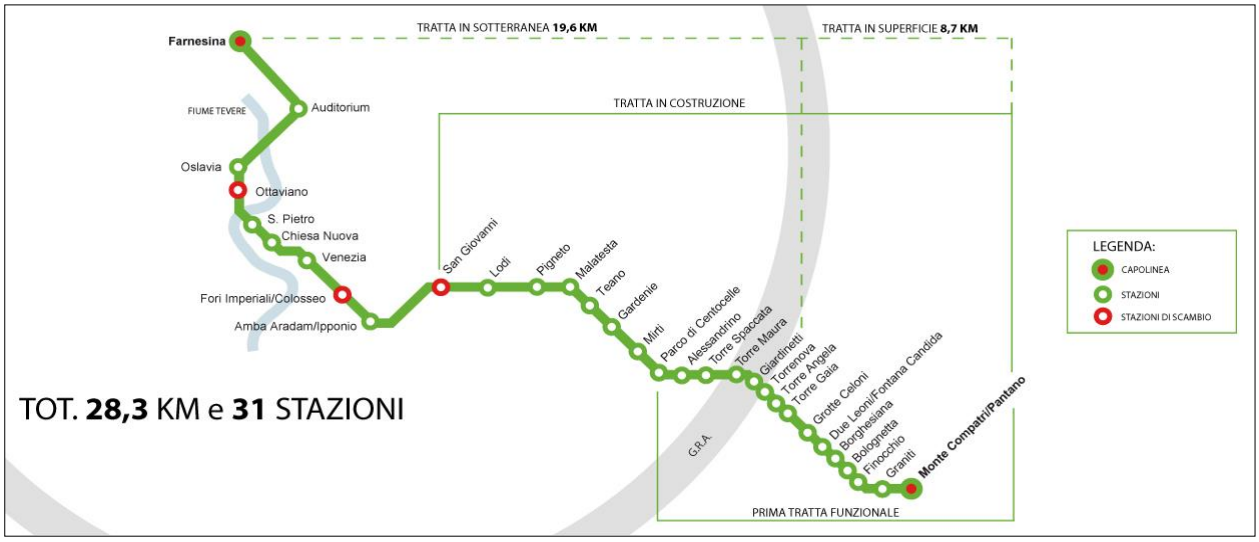


Figura 1. *Metro C scpa: i soci.*

La prima fase strategica, attualmente in costruzione, da Monte Compatri - Pantano a San Giovanni, si sviluppa per 18.5 km ed è costituita da 22 stazioni e 12 pozzi intertratta di aerazione.

Il progetto della stazione San Giovanni, nodo di scambio tra la Linea C e la Linea A, ha subito importanti modifiche a seguito delle risultanze delle indagini archeologiche preventive all'esecuzione dei diaframmi perimetrali, che hanno rinvenuto la presenza di strutture antiche da preservare durante lo scavo del corpo stazione. A seguito di tali rinvenimenti, la Soprintendenza Speciale per i Beni Archeologici di Roma ha richiesto l'eliminazione di qualsiasi tipo di consolidamento da piano campagna, l'esecuzione di scavi con modalità archeologica nei terreni di riporto, fino a circa 18 m da piano campagna, e l'impossibilità di effettuare scavi meccanizzati per la realizzazione delle gallerie di linea in questi terreni.

Figura 2. *L'intero tracciato della Linea C.*



Tali richieste hanno comportato la modifica plano-altimetrica del tracciato con l'abbassamento della livelletta a partire dalla Stazione Lodi e la revisione globale del progetto della Stazione San Giovanni che ha subito un approfondimento del fondo scavo di circa 14 m.

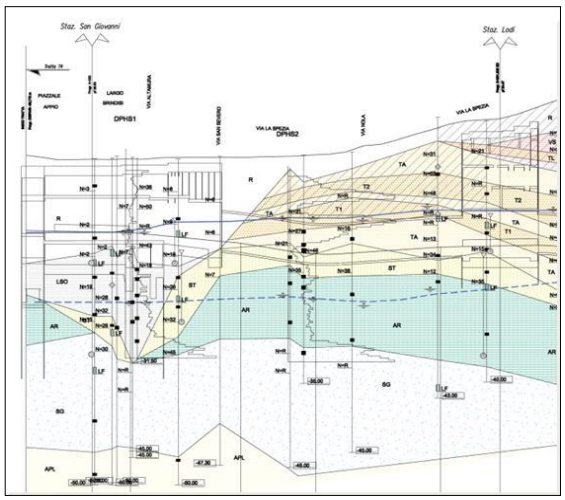
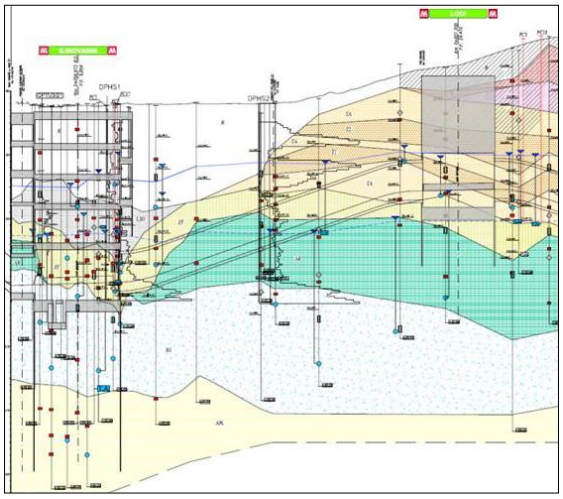


Figura 3. *Profilo longitudinale della linea pre*



variante inserito nel contesto idrogeologico.

Figura 4. *Profilo longitudinale della linea post variante inserito nel contesto idrogeologico.*

Dovendo coniugare le esigenze costruttive di limitare i tempi di realizzazione e di evitare, durante lo scavo archeologico, l'utilizzo di puntoni metallici provvisori per il contrasto delle paratie perimetrali soggette, oltre che alla spinta del terreno, anche a quella degli edifici adiacenti con la necessità di limitare lo spessore dei solai per permettere il passaggio degli impianti e la fruibilità degli spazi e data l'impossibilità di inserire appoggi intermedi dei solai, si è introdotto in progetto l'utilizzo di Travi PREM completamente autoportanti in fase di getto su luci di circa 20 m.

2. LE PRINCIPALI TEMATICHE E SCELTE PROGETTUALI

La Stazione San Giovanni della Linea C si inserisce nel difficile contesto urbano del quartiere Appio - Latino e si sviluppa per circa 120 m, lungo via La Spezia in adiacenza all'omonima stazione della Metropolitana di Roma - Linea A.

Figura 5. *Ortofoto con l'evidenziazione del corpo stazione pre variante (rosso) e post variante (giallo).*

Figura 6. *Vista dall'alto del cantiere.*

Nell'ambito della variante, al fine di ridurre il rischio archeologico durante lo scavo, si è limitato lo sviluppo planimetrico della stazione, spostando la connessione ferroviaria prevista a valle della stazione stessa in un apposito manufatto ubicato nella zona di piazza Malatesta.

L'impossibilità di effettuare un tampone di fondo, l'approfondimento dello scavo che arrivando a 30 m da piano campagna raggiunge lo strato della sabbie e ghiaie, le scadenti caratteristiche meccaniche dei terreni, Riporti (R) e Paleotevere (LSO), con

l'importante carico idraulico, hanno reso necessario l'allungamento delle paratie perimetrali fino ad intestarsi nelle argille plioceniche comunemente note come argille azzurre vaticane.

Questo litotipo presenta una permeabilità molto bassa e ottime caratteristiche meccaniche non drenate che assicurano la stabilità del fondo scavo nel breve periodo.

La presenza dei palazzi a destra e sinistra dello scavo assieme alla necessità di sotto passare la stazione esistente San Giovanni Linea A, realizzando due gallerie naturali tra i pali di fondazione, ha imposto un'intervia tra le due vie di corsa non superiore a 15 m che non ha permesso l'inserimento di appoggi intermedi per il sostegno degli orizzontamenti della stazione.

Il contatto con la Stazione esistente ha imposto inoltre la posizione dei solai, infatti, per non alterare l'equilibrio nei confronti delle azioni orizzontali, gli orizzontamenti delle due stazioni devono necessariamente essere allineati e lo spessore non può superare 1.00 m per garantire il passaggio degli impianti e la fruibilità degli spazi.

Nell'ambito dello studio delle nuove fasi esecutive, che imponevano l'utilizzo di uno scavo con modalità archeologica per i primi 18 m, e non volendo rinunciare ai vantaggi del "top - down", con l'esecuzione dei solai in discesa che fungono da puntone per le paratie perimetrali, si è studiato una metodologia di scavo che prevede per ogni solaio:

I. Scavo con metodologia archeologica fino circa 1.00 m sotto l'intradosso del solaio;

II. Esecuzione del cordolo perimetrale poggiato su tasche ricavate nel diaframma e appeso al solaio di copertura mediante barre dywidag;

III. Approfondimento dello scavo con metodologia archeologica fino a circa 3.00 m al di sotto del solaio;

IV. Esecuzione del solaio mediante l'utilizzo di strutture autoportanti e successivo getto di completamento e solidarizzazione.

Tale successione realizzativa, eliminando lo scavo al fronte, tipico della metodologia "top-down" con i solai gettati contro terra, permette l'approfondimento scavo per piani orizzontali, preservando le strutture antiche.

Figura 7. Ritrovamenti archeologici - Ambiente osteria.

Figura 8. Ritrovamenti archeologici - Ambiente vasche di raccolta.

Nell'ambito delle strutture autoportanti in fase di getto si è scelto l'utilizzo di travi prefabbricate reticolari miste, primarie, secondarie e rompi tratta, aventi sezioni variabili tra gli 80 e i 100 cm e luci fino a 20 m assieme a predalle nervate anch'esse autoportanti in fase di getto fino a 8 m di luce e spessore di solaio finito di 40 cm.

Il sistema così concepito risulta molto versatile e ben si adatta alla presenza di molteplici asolature di grandi dimensioni come quelle per il passaggio dei corpi scale e dei canali di ventilazione. La necessità di realizzare un orizzontamento completamente autoportante, con luci di 20 m e posto a circa 3 m dal piano di lavoro, ha reso necessario lo studio di fasi lavorative e dettagli costruttivi che permettessero l'assemblaggio dell'insieme travi/predalle in completa sicurezza limitando al minimo l'interferenza tra le differenti lavorazioni che devono essere eseguite ognuna da maestranze specializzate: varo, accoppiamento delle travi, posa delle predalle, montaggio delle armature di completamento e successivo getto di solidarizzazione.

Figura 9. *Predalle nervate.*

Figura 10. *Posa in opera delle armature di completamento.*

Figura 11. *Vista, dal basso, di un solaio già realizzato.*

3. IL SISTEMA TRAVI PREFABBRICATE RETICOLARI MISTE

La scelta dell'impiego delle travi prefabbricate reticolari miste, nella costruzione della stazione San Giovanni, è stata dettata da molteplici esigenze e condizioni al contorno. Esse si inquadrano perfettamente all'interno del sistema top-down utilizzato, costituendone i puntoni discreti, mentre la soletta continua in cemento armato di spessore 40 cm garantisce un'adeguata rigidezza anche nei confronti delle azioni orizzontali dovute alle spinte del terreno, dell'acqua e degli edifici adiacenti allo scavo, punzonando già durante lo scavo le paratie perimetrali. Inoltre presentano una notevole rapidità di posa in opera e facilitano la realizzazione dei solai intermedi in fase di risalita a causa delle caratteristiche di fruibilità che conferiscono agli spazi di manovra delle attrezzature di scavo.

Visto il notevole numero di Travi PREM previsto per ogni orizzontamento (circa 45), la geometria della trave che raggiunge i 20 m ed il peso della singola trave che supera talvolta le 20 t, si è reso necessario un progetto accurato del varo e della movimentazione sotto copertura delle travi stesse.

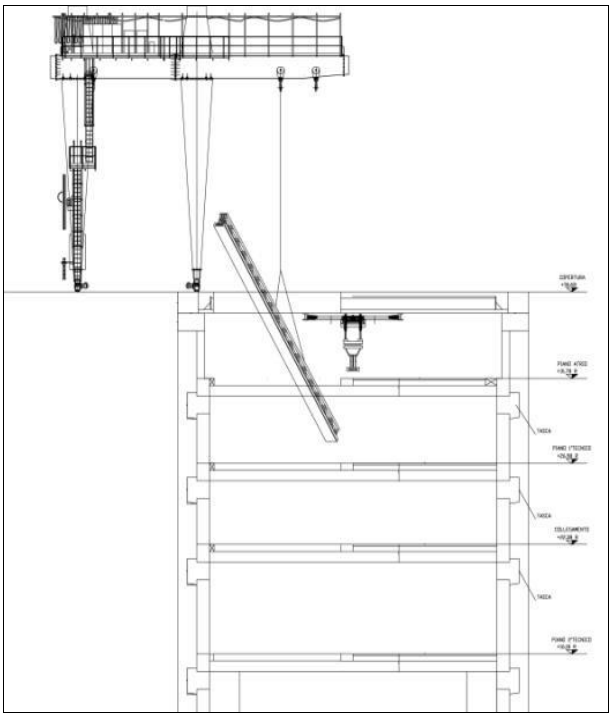


Figura 12. *Schema varo travi PREM sotto copertura.*

A tal proposito sono state previste due asole provvisorie 15 x 8 m, all'estremità del corpo

stazione, per il calaggio dei materiali da costruzione e l'estrazione dello smarino ed un doppio carroponte, appeso al solaio soprastante a quello da realizzare, per permettere la movimentazione delle travi e delle predalle nervate.

Figura 13. *Asole provvisorie per calaggio travi.*

Figura 14. *Calaggio trave in asola.*

Figura 15. *Carroponte per calaggio travi sotto copertura.*

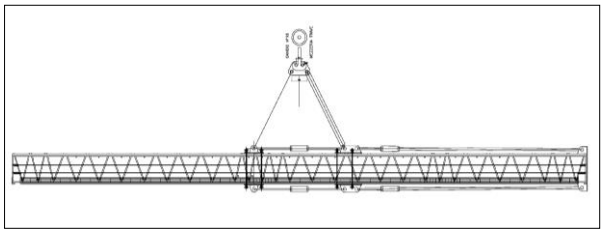


Figura 16. *Meccanismo per il calaggio della trave sotto copertura - carroponte.*

Figura 17. *Calaggio trave in asola.*

Figura 18. *Calaggio trave in asola.*

Figura 19. *Movimentazione trave sotto copertura.*

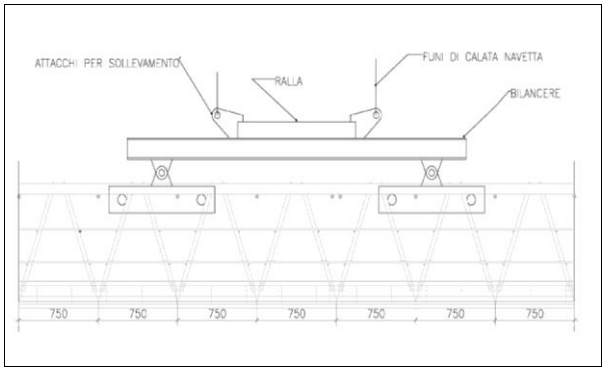


Figura 20. *Meccanismo per il trasporto della trave sotto copertura - carroponte.*

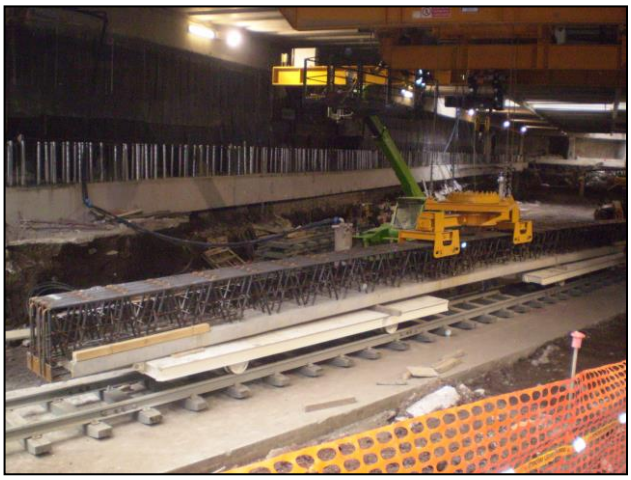


Figura 21. *Movimentazione trave sotto copertura.*

Figura 22. *Posa trave sotto copertura.*

Le travi prefabbricate reticolari miste hanno una sezione molto contenuta rispetto all'area complessiva di impronta della stazione, e presentano le richieste caratteristiche di autoportanza in fase di getto.

L'autoportanza conferisce all'elemento strutturale la capacità di resistere, in sicurezza, ai carichi di progetto di prima Fase (che comprende il getto, sulla porzione di impalcato ad essa afferente, del calcestruzzo di completamento, fino al momento in cui questo raggiunga la resistenza di progetto prefissata per l'inizio della seconda Fase), senza puntellazione. I carichi assorbiti in autoportanza sollecitano unicamente il traliccio in acciaio della trave e, solo in fase finale, è coinvolto nella resistenza complessiva anche il cls indurito, sollecitato solamente, in esercizio, dai carichi di seconda fase.

Ciò significa che, a parità di carichi complessivi, una trave in autoportanza subisce i fenomeni di viscosità del cls solo a causa dei carichi di

seconda fase e, quindi, in quantità del tutto inferiore rispetto ad una trave classica in c.a. gettata in opera. Questo fattore ha anche un'altra importante conseguenza e cioè che, essendo stata la freccia iniziale bilanciata dalla monta di fabbricazione, tutti i carichi subiti nella fase di autoportanza non producono alcun effetto sulle deformazioni finali.

Le travi prefabbricate reticolari miste, modello PREM a2 (con fondello prefabbricato), sono state utilizzate nel progetto della stazione per tutti e quattro i solai intermedi, a partire dal livello Atrio fino al livello Secondo Tecnico.

Lo schema strutturale della carpenteria tipo prevede tre tipologie di travi: travi principali tipo "T101" ordite tra i due allineamenti perimetrali, realizzate mediante la solidarizzazione di due travi di dimensioni 80x100 cm, portanti i carichi verticali oltre alle spinte trasmesse dalle paratie perimetrali; travi tipo "T102" di dimensioni 100x100 cm, ortogonali alle travi "T101", adiacenti ai vani scala, che, a loro volta, trasferiscono i carichi verticali sulle travi principali "T101"; travi tipo "T103" di dimensioni 100x100 cm, rompitratta in corrispondenza delle ampie asolature previste per i vani scala, che forniscono appoggio immediato alle fasce di solaio di spessore 40 cm, e trasferiscono i carichi sulle travi secondarie "T102".

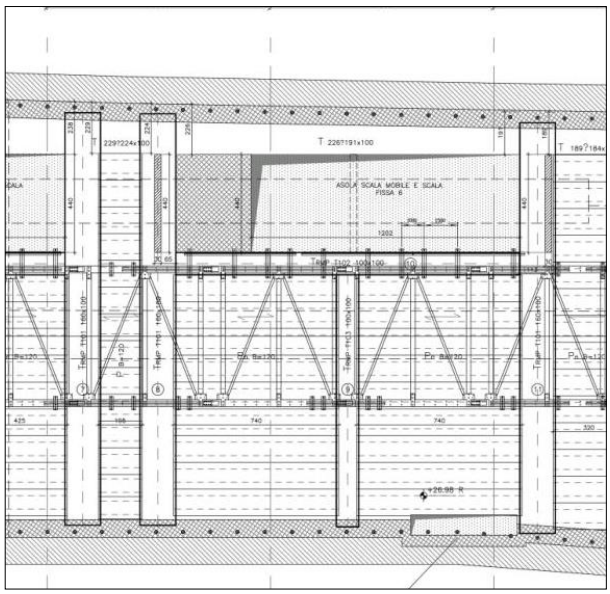


Figura 23. *Stralcio carpenteria tipo.*

Sono previste le seguenti fasi operative: Fase Transitoria "1", Fase Transitoria "2", Fase Transitoria "3", Fase Transitoria "4", Fase Definitiva "5".

Fase Transitoria "1" - posa delle travi principali "T101": in questa fase avviene la posa a secco delle travi principali "T101" sui cordoli, preventivamente gettati in fase di scavo i quali risultano "appesi" al cordolo di sommità delle paratie mediante barre dywidag per assicurare l'assenza di rotazione del vincolo stesso fino alla fase dei getti integrativi dei solai (Fase Transitoria "3"). In questa fase avviene, tramite saldature in opera, la solidarizzazione delle 2 parti metalliche delle travi "T101" e la messa in posizione delle armature aggiuntive di collegamento trasversali interne alle travi.

Fase Transitoria "2" - posa travi secondarie e rompitratta, posa solai e getto delle travi a quota appoggio solaio: in questa fase avviene la posa a secco delle travi secondarie e rompitratta, dei solai autoportanti, la messa in opera delle armature integrative agli appoggi, ed il successivo getto di 40 cm di cls fino alla quota di appoggio dei solai.

Fase Transitoria "3" - getto del solaio: in questa fase si completa il getto di 40 cm delle travi e dei solai. E' questa operazione che porta, ad indurimento avvenuto del cls, alla solidarizzazione dell'impalcato con la cintura perimetrale. Le barre dywidag sono dimensionate per sorreggere il peso dei cordoli, quello delle travi PREM ed il peso del getto di prima fase delle travi, avvenuta la maturazione le stesse risultano finalmente solidarizzate ai cordoli.

Fase Transitoria "4" - montaggio solai sottostanti: in questa fase avviene l'allentamento e quindi l'allungamento delle barre dywidag per ancorare i cordoli perimetrali inferiori e per ripetere le operatività sopra elencate per solai e travi sottostanti. In questa operazione la trave che risulta completamente solidarizzata con la sella di appoggio risulta, per effetto dell'allentamento delle barre di ancoraggio, sollecitata da un incremento di flessione dovuta alla migrazione del suo punto di appoggio. In questa situazione agiscono i carichi del carroponte sotto copertura appeso all'impalcato per il montaggio del livello sottostante.

Le analisi dei carichi della Fase Transitoria "4" sono state condotte tenendo conto dei carichi massimi trasmessi dal carroponte.

Gli effetti dovuti ai carichi trasmessi dal carroponte sono sovrapposti con gli effetti prodotti dal peso proprio dell'intero solaio e ad un sovraccarico accidentale in fase transitoria di intensità valutata pari a 4.0 kN/m^2.

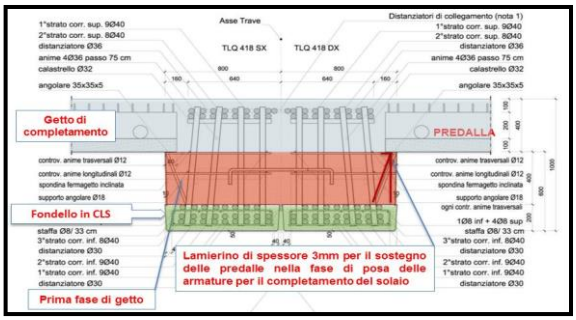
Fase Definitiva "5" - carichi a regime a pareti completate: in questa fase vengono completate le fodere perimetrali e la trave è nella sua configurazione di carichi a regime, ivi inclusa la spinta del terreno.

Le verifiche effettuate analizzano la trave sia nella configurazione iniziale (vedi carichi in Fase Transitoria “1”, “2”, “3”), in cui la sezione reagente è costituita dal manufatto prefabbricato, che nella configurazione di esercizio (vedi carichi in Fase Transitoria “4”, Fase Definitiva “5”) in cui la sezione reagente è una trave composta acciaio-cls, nella quale la trasmissione degli sforzi fra le anime ed i correnti avviene per continuità tramite le saldature e non per aderenza delle barre; da ciò discende la non obbligatorietà del rispetto degli interferri propri delle sezioni in c.a. e la necessità di una opportuna granulometria che deve essere compatibile con gli interferri minimi delle Travi PREM pari a 28 mm.

Durante la posa delle predalle ed il successivo montaggio delle armature di completamento del solaio, i carichi verticali vengono sorretti da un lamierino metallico di spessore 3 mm, opportunamente controventato, che funge anche da cassero laterale per il getto di prima fase.

Le travi PREM, le T101, T102, e T103, sono formate da tralicci metallici in barre, di cui quelle inferiori sono disposte all’interno di un fondello prefabbricato di calcestruzzo, di spessore 20 cm, con copriferro idoneo a garantire i prescritti requisiti di resistenza al fuoco propri della classe R120.

Figura 24. *Sezione trasversale tipo di 2 travi principali accoppiate.*



Nella determinazione degli effetti tensionali dovuti al ritiro del calcestruzzo della soletta collaborante è stato trascurato il contributo del getto preliminare della trave, da effettuarsi in opera, in quanto trascurabile e baricentrico, come azione, rispetto al contributo del getto del pacchetto solaio. Ragionando in termini di congruenza di deformazioni tra il cls della soletta collaborante e l’acciaio della reticolare, si è valutato lo sforzo di compressione da ritiro N_r in corrispondenza del raggiungimento della resistenza a trazione f_{ctm} del calcestruzzo della soletta, e le tensioni da esso prodotte.

Al fine di contrastare i fenomeni fessurativi conseguenti agli stati di trazione dovuti al carico esterno e al ritiro del calcestruzzo, il cui libero sviluppo è impedito dalla presenza delle barre metalliche, per il calcestruzzo del fondello è stata utilizzata una miscela appositamente studiata e ottimizzata mediante indagini sperimentali. Tali indagini hanno evidenziato il ruolo determinante ed i dosaggi ottimali di uno speciale additivo capace di provocare l’espansione del calcestruzzo nella sua fase indurente. L’aggiunta di additivo antiritiro nei getti induce nel fondello prefabbricato un incremento di resistenza a trazione f_{ctm} stimato pari a 15 daN/cm^2 sulla base della vasta ricerca sperimentale svolta da Assoprem sotto la direzione dell’Università degli Studi di Brescia, ma ai fini delle verifiche cautelativamente se ne considera il 50% quindi si è assunto pari a 7,5 daN/cm^2. Questo accorgimento ha permesso di tenere sotto controllo l’insorgenza dei fenomeni fessurativi in tutte le travi.

Figura 25. *Vista trave PREM.*

Figura 26. *Vista trave PREM.*

4. CONCLUSIONI

Attualmente lo scavo del corpo stazione è giunto a circa 15 m da piano campagna ed il monitoraggio geotecnico in corso d'opera sta fornendo ottimi risultati, evidenziando una sostanziale stabilità dei fabbricati adiacenti lo scavo e una perfetta corrispondenza tra la deformata di progetto, circa 3 mm, e la deformata misurata mediante inclinometri a lettura automatica installati nelle paratie.

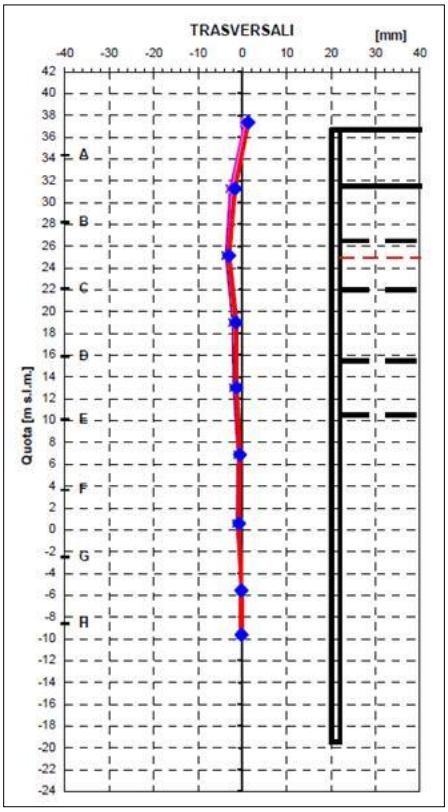


Figura 27. *Deformata di una paratia - lettura inclinometro*

Il sistema costruttivo adottato ha permesso la realizzazione di un solaio (posa travi, predalle e getto di completamento), esclusi cordoli perimetrali, in 45 giorni solari, perfettamente in linea con i tempi di realizzazione di un solaio gettato contro terra ma con tempi ampiamente più brevi nella realizzazione dello scavo. Le attività di smontaggio e rimontaggio del carroponte, per la movimentazione delle travi sottocopertura, si effettuano in parallelo con lo scavo archeologico preventivo all'esecuzione dei cordoli perimetrali e non comportano quindi un aggravio di tempo nell'esecuzione del solaio stesso.

5. BIBLIOGRAFIA

[01] **PROGETTARE CON LE TRAVI PREFABBRICATE RETICOLARI MISTE, PREM,** Tecniche Nuove.

[02] **N. TULLINI.** "Stima dello scorrimento richiesto dalle connessioni di travi prefabbricate reticolari miste" Atti del 17° Congresso CTE, Roma, 6-8 Novembre 2008.

[03] **D.M. 14-01-08.** "Norme Tecniche per le Costruzioni", par. 4.6 .

[04] **Linee Guida del CSLLPP per l'utilizzo di travi travi tralicciate in acciaio conglobate nel getto di calcestruzzo collaborante e procedure per il rilascio dell'autorizzazione all'impiego.**

[05] **G. PLIZZARI E L. COMINOLI**, "Dalla Ricerca Nazionale Coordinata Assoprem lo studio sui fondelli di calcestruzzo delle Travi Reticolari Miste: risultati sperimentali e nuove soluzioni", PREMmagazine n.1/2008, pagg. 8 e 9.

[06] **P. RIVA E F. MINELLI**, "Dalla Ricerca Nazionale Coordinata Assoprem l'analisi condotta con strumenti software moderni porta a nuove conoscenze", PREMmagazine n.2/2008, pagg. 8 e 9.

[07] **O. MOLINARI**, "Istruzioni per Travi Reticolari Miste: Capitolo 4. Quali materiali sono previsti per le Travi PREM nel documento che sarà finalizzato entro l'anno", PREMmagazine n.2/2008, pagg. 14 e 15.

[08] **M. SAVOIA E L. VICENZI**, "Dalla Ricerca Nazionale Coordinata Assoprem l'analisi teorica e sperimentale sulla stabilità delle Travi PREM in prima fase", PREMmagazine n.3/2008, pagg. 8 e 9.

[09] **W. CARNI**, "Istruzioni per Travi Prefabbricate Reticolari Miste: Capitolo 3. Principi di progettazione per le Travi PREM nel documento finalizzato entro l'anno", PREMmagazine n.3/2008, pagg. 14 e 15.

[10] **N. TULLINI**, "Dalla Ricerca Nazionale Coordinata Assoprem la duttilità e la resistenza nelle connessioni delle Travi PREM", PREMmagazine n.4/2008, pagg. 8 e 9.

[11] **G. PLIZZARI E FAUSTO MINELLI**, "Istruzioni per Travi Prefabbricate Reticolari Miste: Capitolo 5. Principi strutturali per le Travi PREM nel documento che sarà finalizzato entro l'anno", PREMmagazine n.4/2008, pagg. 14 e 15.

6. RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano lo studio Via Ingegneria, nella persona dell'Ing. Giovanni Piazza per la professionalità dimostrata nel corso della collaborazione alla progettazione di un'opera di ingegneria così complessa, e lo studio Engroup Engineering nella persona del progettista delle travi prefabbricate reticolari miste l'Ing. Andrea Malnati e Simone Morchi per l'alta competenza nel settore specialistico delle strutture miste.

Contatti con gli autori:

Eliano Romani:
e.romani@metrocspa.com
Francesco Maria Rotundi:
fm.rotundi@metrospa.com
Manuela Contaldo:
manuela.contaldo@engroup.it
Livio Izzo:
livio.izzo@fastwebnet.it