

Nodo ferroviario di Pregnana

# Prefabbricazione vincente



MARCO PETRANGELI \*

GAETANO USAI\*\*

MASSIMO PIETRANTONI \*\*\*

Le gallerie artificiali del nodo di Pregnana sulla nuova linea ferroviaria ad alta velocità Torino-Milano

Foto 1 - Foto aerea del Nodo di Pregnana

## Introduzione

Il tracciato della nuova linea ferroviaria Alta Velocità (AV) Torino-Milano si sviluppa per tutto il tratto piemontese in affiancamento sul lato Sud all'Autostrada A4. In località Pregnana Milanese, circa 17 chilometri a Est del Fiume Ticino, la linea sovrappassa prima la Linea Storica

(LS) e quindi l'Autostrada (unico scavalco lungo l'intera tratta) spostandosi a Nord di quest'ultima (Foto 1). Una volta oltrepassata l'A4 la nuova ferrovia inizia l'ampia curva verso Sud-Est per entrare a Milano in affiancamento alla LS.

In definitiva, per circa 4 chilometri, la nuova linea AV corre alta sul piano di campagna scavalcando la Linea Storica e l'autostrada A4 con due gallerie artificiali di grandi dimensioni interamente realizzate con elementi in cemento armato prefabbricato. Tra le due gallerie e per diverse centinaia

di metri prima e dopo le stesse, la linea AV corre invece su viadotti realizzati con travi in c.a.p. standard da 25 metri. Una ulteriore complessità del Nodo di Pregnana è data dall'attraversamento della Strada Comunale Bareggio-Pregnana che sottopassa, con un'altra galleria artificiale, l'Autostrada poco prima dell'intersezione con la linea AV. Si realizza in questo modo un nodo a tre livelli costituiti, dall'alto verso il basso, dalla linea AV in viadotto, dall'Autostrada in trincea (imbocco galleria) e dalla S.C. Bareggio-Pregnana in galleria

\*PROF. ING., UNIVERSITÀ "G. D'ANNUNZIO" - PESCARA

\*\*ING., INTEGRA SRL - ROMA

\*\*\*ING. GEOL., INTEGRA SRL - ROMA

(Foto 2 e 3).

La grande estensione delle opere del nodo di Pregnana è dovuta all'effetto combinato della estrema rigidità dell'andamento plano-altimetrico dell'asse ferroviario e del modestissimo angolo di incidenza con il quale la nuova linea AV scavalca l'autostrada (8° gradi circa) e la Linea Storica (20° gradi circa).

Per l'attraversamento della LS è stata realizzata una galleria artificiale di 75 metri

di lunghezza, mentre per l'attraversamento dell'autostrada si è ricorso ad una galleria di circa 600 metri di lunghezza. Mentre la prima ha una larghezza di circa 15 metri, in quanto deve alloggiare 2 binari superiormente (AV) e inferiormente (LS) (Foto 4), la galleria di attraversamento autostradale ha una larghezza complessiva di quasi 50 metri (Foto 5) dovendo alloggiare al suo interno le due carreggiate autostradali già predisposte per

la 4° corsia. La peculiarità di queste opere consiste nel totale ricorso, per la prima volta in ambito ferroviario, alla prefabbricazione in stabilimento di elementi strutturali successivamente solidarizzati nei nodi col sistema cosiddetto del "giunto bagnato". Fino a questa esperienza infatti, la prefabbricazione in ambito ferroviario si era sostanzialmente limitata alle travi da ponte in c.a.p. a fili pretesi.

A completare l'approccio di tipo "industriale" dell'intera opera, per le fondazioni su pali si è fatto ricorso alla tecnica dell'elica continua con asportazione parziale del terreno (CFA) che ha consentito produzioni elevatissime e costanti, limitando al minimo le incertezze realizzative e quindi i tempi di esecuzione.

**Foto 2** - Imbocco della galleria artificiale S.C. Bareggio-Pregnana in sottopasso alla A4 e AV

**Foto 3** - Uscita della galleria artificiale S.C. Bareggio-Pregnana in affiancamento alla A4





## La Galleria di Scavalco della A4

L'opera principale del nodo di Pregnana è la galleria artificiale di intersezione fra la linea ferroviaria AV e l'autostrada A4. L'opera è situata nel comune di Pregnana Milanese, tra le progressive km 114+641 e km 115+231 della linea AV. La galleria permette il passaggio al

suo interno dell'autostrada A4 (luce netta per ogni carreggiata 22.5m) e sostiene in quota il doppio binario della linea AV la cui velocità di progetto è pari a 300km/h. La galleria è costituita complessivamente da 15 conci separati da giunti strutturali che interessano sia l'elevazione che la fondazione. I conci sono di tre tipi: i due conci iniziali e i due finali a "farfalla", i tre conci centrali a doppia canna e gli otto conci intermedi a canna singola. La conformazione a farfalla dei conci in entrata e in uscita alla galleria è determinata dal fatto che in questo tratto l'asse dei binari fuoriesce dall'impronta dell'autostrada e quindi la galleria presenta due appendici esterne su cui si intesta, in retto, la nuova linea che corre da entrambi i lati in viadotto.

I conci hanno lunghezza di 36.2m e 40.2m, ad eccezione di quelli posti all'inizio e alla fine che sono di lunghezza pari a 55.6m per il concio 1, 44.2m per il concio 2 e 36.3m per concio 15. La lunghezza

**Foto 4** - Vista interna della galleria artificiale sulla linea storica To-Mi

**Foto 5** - Imbocco lato Torino della galleria artificiale di Pregnana di scavalco della A4

complessiva dell'opera è di 592 metri. In corrispondenza della galleria, il tracciato ferroviario presenta un raggio planimetrico pari a 5500m.

## La copertura

La copertura della galleria è costituita da travi prefabbricate a T rovescio (Foto 6) in cemento armato ordinario (H=1.95m, B=1.0m, L= 23.0m) poste ad interasse di 1.0m (accostate) sulle quali viene gettata in opera una soletta collaborante dello spessore di 25cm. Le travi sono disposte perpendicolarmente all'asse della autostrada con pendenza pari a 1.5%. Lo spazio compreso fra le anime delle travi è riempito con polistirolo espanso ad alta densità (Foto 7).

Le travi, oltre ad essere collegate in testa alla soletta, sono solidarizzate a due trasversi intermedi longitudinali gettati in opera (lunghi quanto i conci), di larghezza pari a 50cm ed altezza uguale a quella delle travi.

Per i conci di estremità vale quanto detto per i precedenti con la sola eccezione che questi presentano anche un corpo esterno all'impronta della autostrada realizzato con solettone pieno gettato in



**Foto 6** - Le travi principali della g.a. di Pregnana stoccate nel piazzale dello stabilimento di produzione

**Foto 7** - Le travi principali della g.a. di Pregnana prima del getto della soletta

opera dello spessore di 80cm. Per ottenere la pendenza longitudinale richiesta dalla linea ferroviaria, per il tratto "A" (canna singola imbocco lato Torino) sia l'impalcato che le fondazioni hanno la stessa inclinazione longitudinale pari allo 0.37%; per il tratto "B" (canna doppia) hanno inclinazione longitudinale pari allo 0.17%, mentre per il tratto "C" (canna singola imbocco lato Milano) l'inclinazione longitudinale è nulla.

Con l'impostazione geometrica sopra descritta, la superficie strutturale finita approssima molto da vicino la geometria del piano del ferro. Ciò nonostante alcune ricariche si sono rese necessarie per adeguare l'estradosso strutturale della galleria, composta di una serie di falde piane appartenenti ai conci successivi, con la superficie continua necessaria al piano del ferro. Il progetto delle ricariche è stato effettuato mediante l'ausilio di un programma di tracciamento stradale con modellazione numerica del terreno (in questo caso rappresentato dall'estradosso strutturale della galleria).

**Foto 8** – Sollevamento di un pilastro prefabbricato della g.a. di Pregnana

**Foto 9** – Dettaglio dell'asola nella trave di fondazione con il dispositivo di centraggio del pilastro



**Foto 10** – Sostegno provvisorio dei pilastri prefabbricati con alla base i dispositivi di regolazione

### Le sottostrutture

L'impostazione geometrica di tutta l'opera ha permesso di mantenere costanti le dimensioni, oltre che delle travi, sia dei pilastri sia delle pareti prefabbricate, semplificando al massimo tutte le attività di prefabbricazione, trasporto e montaggio. Le sottostrutture sono dunque di tre tipologie:

- l'allineamento in asse A4 è costituito, per tutti i conci, da una parete in c.a. parzialmente prefabbricata (bilatra) di larghezza costante pari a 1.4m;
- gli allineamenti esterni ai due cigli autostradali sono realizzati da pilastri prefabbricati pseudo-rettangolari con dimensioni in sezione pari a 2.0mx1.0m posti ad interasse di 4.0m;
- solo per i tratti iniziale e finale della galleria (le "farfalle"), l'ulteriore allineamento esterno è realizzato da colonne circolari gettate in opera di 1.0m di diametro poste ad interasse di circa 4.0m.

I pilastri sono totalmente prefabbricati



(Foto 8); la solidarizzazione alla fondazione è avvenuta per mezzo di un getto di seconda fase di calcestruzzo praticato all'interno di un'asola ricavata nella fondazione stessa (Foto 9). In corrispondenza di questa asola (ottenuta grazie all'impiego della lamiera stirata quale sponda impermeabile al getto, ma perforabile dalle barre d'armatura) è stato calato il pilastro prefabbricato con le armature longitudinali di forza fuoriuscenti dalla base del pilastro stesso.

Per garantire la verticalità del pilastro sino ad indurimento del calcestruzzo di sutura, questo è stato appoggiato sul plinto per mezzo di un sistema di sostegno provvisorio realizzato in carpenteria metallica e dotato di viti di regolazione (Foto 10). Tale carpenteria metallica è agganciata ai



pilastri con barre di precompressione infilate in fori passanti predisposti alla base di questi. Tra i pilastri esterni posti a 4m di interasse, le travi di impalcato sono state provvisoriamente sostenute da travi longitudinali prefabbricate solidarizzate ai pilastri con un getto di calcestruzzo. Successivamente al posizionamento delle velle prefabbricate di bordo è stato effettuato il getto di completamento della trave longitudinale. La bilastra (Foto 11-12) è l'elemento prefabbricato per la realizzazione di pareti piene portanti costituito da

una coppia di lastre parallele in cemento armato di piccolo spessore (8cm), rigidamente distanziate da barre d'armatura disposte a "greca", costituenti il doppio cassero del getto in opera del calcestruzzo necessario ad ottenere l'elemento compiuto. Nella fase di prefabbricazione sono state inserite nelle lastre le armature longitudinali necessarie da progetto per ottenere una bilastra "strutturale"; questo ha permesso di ridurre al minimo indispensabile (solo nei giunti tra pannelli) l'onerosa aggiunta di armatura in opera.

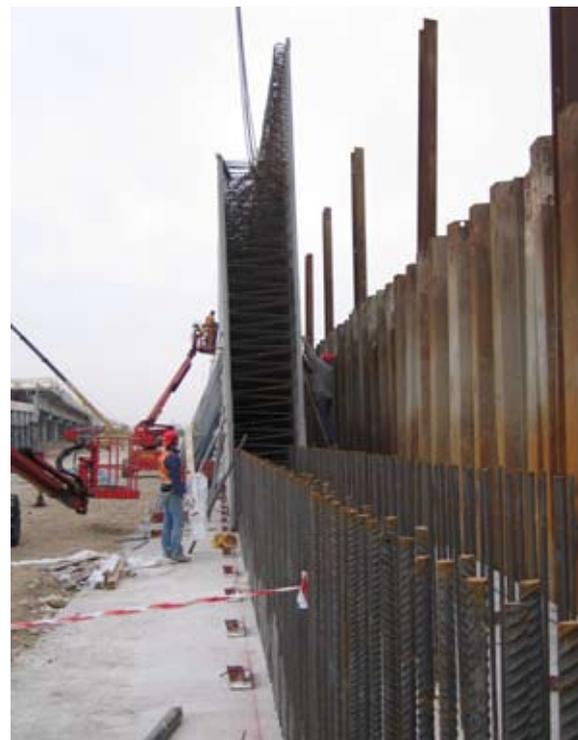
**Foto 11** – Un pannello prefabbricato bilastra prima del montaggio

**Foto 12** – Posa in opera di un pannello prefabbricato bilastra



**Le fondazioni**

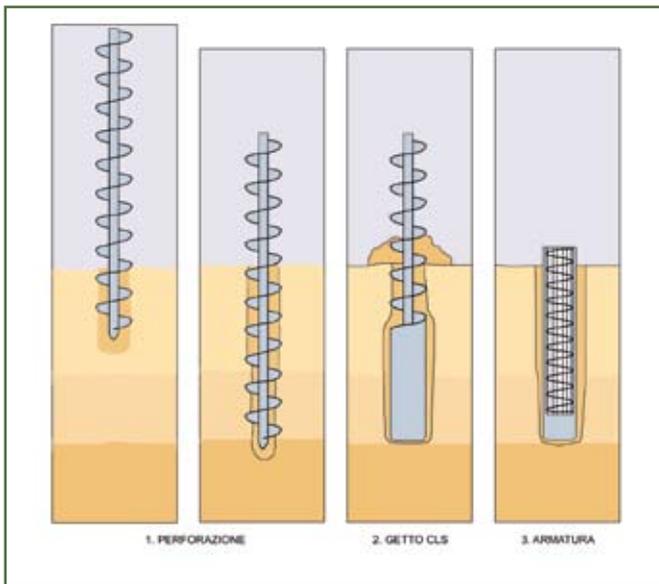
Vista la notevole estensione dell'opera e la necessità di operare in soggezione di traffico, la scelta della tipologia e della tecnologia costruttiva delle fondazioni si è rivolta su un approccio in grado di ridurre al minimo le incertezze realizzative, garantendo un avanzamento dei lavori certo, regolare e veloce. L'approccio di tale criterio rispondeva anche alla necessità di garantire una procedura di cantiere sistematica, vista la scelta di prefabbricare gran parte della struttura. E stata prevista una fondazione nastroforme continua di spessore pari a 1.30m su pali trivellati di grande diametro ( $\varnothing=1000\text{mm}$ ) disposti su 3 allineamenti (Foto 13). Solo



i primi e gli ultimi due conci a farfalla della galleria hanno una fondazione diretta a platea. Con i criteri prima esposti si è optato per la tecnologia dei pali "ad elica continua con asportazione parziale del terreno", nota anche con

**Foto 14** - Attrezzatura per realizzazione pali CFA "continue flight auger"

**Foto 13** - Pali di fondazione della g.a. di Pregnana



**Figura 1** - Schema delle fasi esecutive dei pali CFA

il termine CFA ("continuous flight auger") (Foto 14). Questa tecnologia prevede le seguenti fasi realizzative (vedi schema di figura 1):

- Perforazione mediante una elica continua cava; l'asta è chiusa all'estremità inferiore durante l'infissione nel terreno.
- Raggiunta la profondità di progetto si procede al getto del palo: il calcestruzzo viene immesso attraverso l'asta e fuoriesce in pressione alla base della stessa mentre l'asta viene estratta gradualmente dal terreno.
- A getto ultimato l'armatura del palo viene inserita nel calcestruzzo ancora fresco; per facilitare l'infissione, la gabbia di armatura è dotata di una rastrematura sul fondo e di particolari rinforzi.

I vantaggi di questa tecnologia sono ben noti e vengono solo richiamati brevemente:

- Minore disturbo del terreno nell'in-

**Figura 2** - Curva carico-abbassamento di un palo di fondazione realizzato con sistema CFA

**Figura 3** - Interpolazione della prova di carico per la determinazione del carico limite del palo

torno del cavo, a causa del ridotto volume di terreno che viene asportato durante la perforazione e della compressione operata sulle pareti stesse; il minore volume di terreno asportato riduce anche i problemi ambientali legati al trasporto in discarica del materiale di risulta.

- Non necessita di opere di sostegno (tubo-forma o bento-

nite) in quanto la stabilità del cavo è sempre garantita sia nella fase di perforazione (per la presenza dell'elica) sia durante il getto, che avviene contemporaneamente all'estrazione delle aste; di conseguenza, riduzione delle incertezze realizzative dovute a franamenti (condizione particolarmente significativa nel caso in esame, es-

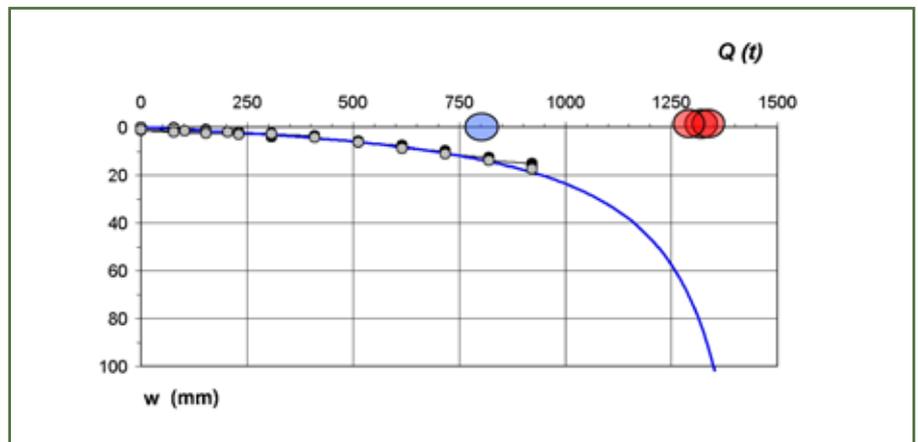
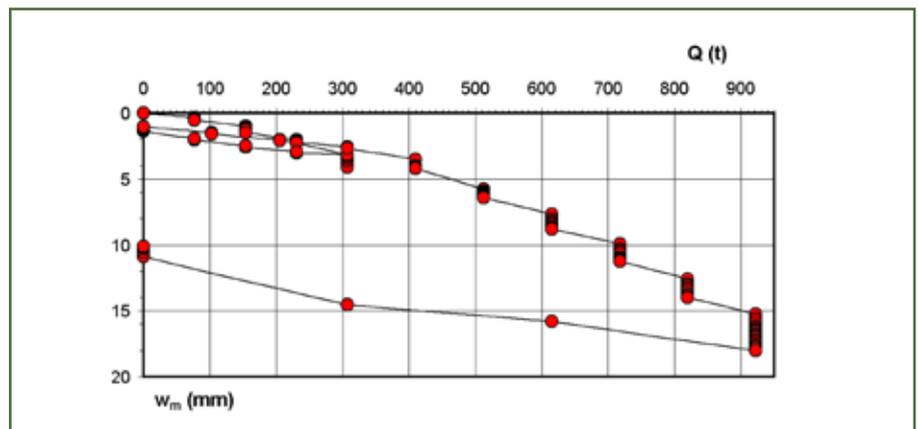
sendo in presenza di terreni sabbioso-gliaiosi interamente immersi in falda).

- Riduzione di vibrazioni e in generale di interferenze su opere circostanti.
- Velocità esecutiva, con produzioni giornaliere molto elevate (fino a 200 ml al giorno), irrealizzabili con pali trivellati tradizionali.

Con questa tecnologia la fase più critica è ovviamente quella dell'infissione dell'armatura nel calcestruzzo ancora fresco che deve avere quindi particolari caratteristiche di fluidità mantenendo le caratteristiche di resistenza richieste. In tale ottica sono stati studiati e realizzati specifici mix-design del calcestruzzo con classe di consistenza S5, confezionato secondo un particolare fuso granulometrico.

Particolare importanza e interesse ha rivestito il primo punto, relativo al disturbo del terreno e di conseguenza all'aumento dell'efficienza del palo stesso.

È noto infatti che con i pali CFA si ottengono valori del carico limite ( $Q_{lim}$ )



generalmente più elevati, a parità di condizioni al contorno, rispetto a quelli dei pali tradizionali.

Ciò è dovuto, oltre che al ridotto disturbo del terreno all'intorno del cavo, anche ad un effetto compattante provocato dalla trivellazione con asportazione parziale del terreno, ma anche dalla pressione operata dal calcestruzzo sulle pareti del terreno durante il getto; come descritto in precedenza il getto avviene infatti dall'interno dell'asta cava, con un carico pari all'intera colonna mantenuto dall'elica, realizzando di fatto un getto in pressione, particolarmente significativo negli strati più profondi.

Tali ipotesi sono state ampiamente confermate dalle prove di carico su pali eseguite prima dell'inizio dei lavori che hanno fornito risultati molto positivi in termini di efficienza del palo stesso. Nelle figura 2 è illustrato il grafico forza-abbassamento ottenuto con una delle prove di carico eseguite sul palo da 16 metri di lunghezza, mentre la figura 3 mostra il corrispondente valore del carico limite ottenuto con la cosiddetta tecnica di interpolazione iperbolica, risultato pari a  $Q_{lim} = 1344t$ .

Tale valore è molto superiore a quello ottenuto in fase di progetto con la formula del metodo AGI (Associazione Geotecnica Italiana) per la resistenza laterale:

$$Q_s = \pi \cdot D \cdot \int_0^L (K \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \sigma'_v) dz$$

in cui:

K coefficiente adimensionale che esprime il rapporto tra la tensione normale alla superficie laterale del fusto agente alla profondità z e la tensione verticale alla stessa profondità ( $\sigma'_v$ );  
 $\delta$  angolo di attrito tra terreno e superficie laterale del palo (nel caso in esame considerato  $\delta = \varphi$ ).

Il valore di  $K=0.6$  adottato in prima analisi secondo le prescrizioni e le Linee Guida Italferr, si è rivelato eccessivamente cautelativo rispetto ai valori di  $K=1$  e angolo di attrito del terreno di oltre  $40^\circ$  ricavati sperimentalmente con

le suddette prove di carico.

Con criterio conservativo e con un approccio che ha tenuto conto della variabilità dei terreni e della forte estensione dell'opera, si è preferito mantenere lo stesso valore dell'angolo di attrito ricavato dalla caratterizzazione geotecnica di progetto ( $\varphi=36^\circ$ ) e aumentare il coefficiente K a 0.9, valore massimo tra quelli indicati in letteratura per questo tipo di tecnologia ( $K=0.7 \div 0.9$  in Viggiani: Fondazioni). Questo approccio ha garantito di conseguenza un elevato margine di sicurezza anche nei riguardi dei cedimenti attesi, che in effetti si sono rivelati trascurabili.

Nonostante gli elevati margini di sicurezza adottati, la tecnologia prescelta ha consentito di ottimizzare la disposizione dei pali, riducendo il numero e la lunghezza rispetto ad una tecnologia tradizionale, con conseguenti benefici in termini di velocità di realizzazione dell'opera e certezza dei tempi.

## Le altre gallerie artificiali del nodo di Pregnana

### La galleria artificiale sulla Linea Storica To-Mi

La galleria artificiale di intersezione fra la linea ferroviaria AV e la linea storica FS è situata nel comune di Pregnana Milanese tra le progressive km 113+763.606 e km 113+838.909 della linea AV, per una lunghezza complessiva di 75m circa. L'opera permette il passaggio al suo interno della ferrovia esistente e sostiene in quota il doppio binario della Linea AV.

La galleria è costituita da un corpo unico, senza giunti longitudinali.

L'impalcato è realizzato con travi prefabbricate a T rovescio (di altezza  $H = 1.20m$ , larghezza  $1.00m$  e lunghezza  $L = 14.20m$ ) ad interasse pari ad  $1.00m$ . Esse sono disposte perpendicolarmente all'asse della galleria con pendenza trasversale nulla, e sono poste tutte alla medesima quota (l'intradosso e l'estradosso delle travi giacciono su due piani orizzontali). L'ottenimento delle pendenze, longitudi-

nale e trasversale, dell'estradosso è totalmente demandato al massetto armato che ha spessore variabile. Lo spazio fra le anime delle travi è riempito con getto in opera di completamento fino all'ottenimento di un solettone pieno dello spessore di  $140cm$ .

Nelle zone di estremità della galleria è stato realizzato un solettone, anch'esso dello spessore complessivo di  $140cm$ , gettato in opera su predalle.

Le sottostrutture sono realizzate da:

- pilastri prefabbricati pseudo-rettangolari smussati ( $2.0 \times 1.00m$ ) posti ad interasse di  $4.00m$ ;
- pilastri circolari gettati in opera, di  $1.00m$  di diametro, posti ad interasse di circa  $4.25m$  nelle zone in inizio e fine galleria dove inizia l'intersezione del treno AV con la linea storica;
- elementi "spalla" gettati in opera sui quali poggiano le campate di inizio e fine di due dei viadotti ferroviari di Pregnana;
- pareti in c.a. gettate in opera poste tra i pilastri prefabbricati rettangolari e completamente scollegate da questi dello spessore di  $1.0m$  e altezza dalla fondazione di  $3.4m$ .

Per i pilastri pseudo-rettangolari prefabbricati e per le travi longitudinali vale quanto detto per la galleria artificiale di scavalco di Pregnana.

Per quel che riguarda le opere provvisorie è stata realizzata una paratia a protezione dello scavo in adiacenza al rilevato autostradale.

Tale paratia è realizzata solo per il breve tratto in cui lo scavo interferisce con il piede del rilevato.

Per le fondazioni della galleria artificiale, considerata la tipologia strutturale, al fine di contenere i cedimenti differenziali tra le diverse parti della struttura e tra la Galleria ed il Viadotto di Pregnana, la fondazione è stata prevista di tipo diretto su terreno trattato con colonne di jet grouting.

Il trattamento è stato realizzato con colonne di diametro  $1.10m$  disposte a maglia, per quanto possibile regolare,  $2.2m \times 2.8m$ .

## La galleria artificiale della Strada Comunale Bareggio-Pregnana

Come precedentemente detto, in prossimità dell'imbocco lato Torino della galleria artificiale di Pregnana si è realizzato un nodo a tre livelli per consentire il sottopassaggio della S.C. Bareggio-Pregnana al di sotto della A4 e della soprastante linea AV. Per rispettare i franchi ferroviari e autostradali, la galleria per il sottopasso della S.C. Bareggio-Pregnana è stata approfondita una decina di metri nel sottosuolo, qui costituito da terreni incoerenti (sabbie e ghiaie) con falda idrica prossima al piano di campagna. Le criticità erano rappresentate dalla necessità di minimizzare il disturbo sulle fon-

**Foto 15** – I diaframmi della galleria artificiale della S.C. Bareggio-Pregnana

**Foto 16** – Il jet-grouting per il “tappo di fondo” della g.a. S.C.



dazioni dell'ultima campata del viadotto di linea AV (prima dell'imbocco in galleria), di garantire il mantenimento del traffico sulla A4 e di ridurre l'interferenza con un manufatto di pregio storico-architettonico (Cascina Serbelloni).

Per questa struttura è stata scelta la tipologia classica di galleria artificiale (cosiddetta “Metodo Milano”).

Sono stati utilizzati diaframmi rettangolari, di dimensioni 80x250 e 100x250cm (Foto 15) puntonati in testa e alla base da solette in c.a.. I vincoli geotecnici e idraulici prima citati hanno costretto ad adottare impegnativi interventi di consolidamento e impermeabilizzazione. Per evitare fenomeni di sifonamento del fondo scavo è stato realizzato un tappo di fondo con colonne di jet-grouting (Foto 16), mentre in corrispondenza della Cascina Serbelloni (affiancata a distanza di circa 3 metri) è stata realizzata preventivamente una cortina di pali secanti con la tecnologia ad elica continua per evitare anche il minimo disturbo in fase di scavo dei diaframmi.

Tali accorgimenti hanno consentito di realizzare l'opera senza alcun disturbo sulle opere ferroviarie e autostradali e su una struttura d'epoca in muratura con fondazioni molto carenti.

## La prefabbricazione

Gli elementi strutturali prefabbricati della galleria artificiale di Pregnana Milanese sono:

- i pilastri;
- le bilastre;
- le travi secondarie longitudinali;
- le travi principali trasversali.

La maggioranza di questi elementi è stata realizzata nello stabilimento di prefabbricazione di Novara. In tale stabilimento sono stati realizzati non solo i prefabbricati della galleria ma anche la gran parte delle travi precomprese a fili aderenti da 20, 25 e 27 metri utilizzate nei viadotti di linea (cassoncini) sia nella tratta Piemontese che in quella Lombarda.

### I pilastri prefabbricati

L'impiego di pilastri in c.a. interamente prefabbricati (Foto 17-18), per opere di tipo ferroviario di questa importanza, è senz'altro una novità assoluta a livello nazionale.

Il gran numero di pilastri da produrre (173 per la galleria di scavalco della A4, 35 per quella di scavalco della linea storica più quelli impiegati in altre opere) ha permesso all'impresa di poter sostenere l'onere di uno studio specifico di tutte le implicazioni che questa soluzione comporta (giunto pilastro-fondazione, giunto





pilastro-travi) oltre, ovviamente, l'onere della realizzazione di un cassero specifico per la produzione di serie in stabilimento.

Per contro i vantaggi ottenuti sono stati:

- ottima qualità costruttiva dei manufatti;
- uniformità in termini di resistenza ed aspetto estetico degli elementi;
- celerità produttiva tipica della produzione in stabilimento, associata alla mancata interferenza con gli agenti atmosferici;
- celerità nella posa in opera.

I temi più importanti affrontati nello studio dei pilastri prefabbricati sono stati:

- il nodo pilastro-fondazione;
- il nodo pilastro-travi di sommità.

Il pilastro tipico ha la sezione di 1.0x2.0m e altezza totale di circa 11 metri. Il peso è pari a circa 35 tonnellate.

### Il nodo pilastro-fondazioni

In questo caso il collegamento (del tipo giunto bagnato – Foto 19) avviene dopo aver eseguito diverse operazioni.

In primo luogo avviene il sollevamento, posizionamento e centraggio del pilastro nella posizione definitiva con le armature di base, che fuoriescono dal calcestruzzo (vedi Foto 8), inserite in una asola ricavata nella fondazione già gettata e indurita. L'asola (Foto 9), che costituisce una discontinuità provvisoria per il solo calcestruzzo e non per le armature della fon-

dazione, interessa trasversalmente tutta la fondazione stessa e si sviluppa longitudinalmente per 1.3m (poco più della larghezza del pilastro).

Per il corretto posizionamento del pilastro si è fatto uso (vedi Foto 8, 9 e 10) di un sistema di centraggio costituito da una piastra di base collocata nella asola di fondazione e da una putrella d'acciaio con punta conica annegata nel pilastro e fuoriuscente dalla base dello stesso. Per il sostegno provvisorio del pilastro durante le fasi di regolazione e nel periodo di maturazione del getto di continuità si è fatto affidamento a quattro "piedini" provvisori in acciaio collegati alla base dei pilastri.

Una volta effettuate tutte le calibrazioni e verifiche di verticalità, e aggiunta l'armatura trasversale integrativa in opera nella fondazione, è stato eseguito il getto di calcestruzzo di solidarizzazione mediante completo intasamento dell'asola.

### Il nodo pilastro-travi-soletta

In questo specifico caso il tema più importante è stato lo studio del collegamento delle barre di testa dei pilastri con quelle poste in opera in soletta per conferire una continuità strutturale laddove i momenti negativi sugli appoggi raggiungono, per queste luci e per questi cari-

**Foto 17** – Vista dei pilastri prefabbricati durante la costruzione della g.a. di Pregnana

**Foto 18** – L'armatura preassemblata dei pilastri durante il calaggio nel cassero

chi, valori ragguardevoli.

Questo problema è infatti tra i più sentiti nella prefabbricazione degli elementi strutturali in quanto risulta difficile gestire eventuali barre fuoriuscenti dal calcestruzzo nelle varie fasi di trasporto, movimentazione e montaggio.

Per la galleria artificiale di Pregnana sono stati impiegati dei manicotti filettati che hanno permesso di "allungare" le barre fuoriuscenti dai pilastri prefabbricati della lunghezza necessaria ad ottenere una adeguata sovrapposizione con i ferri in opera della soletta.

Per quel che riguarda l'interferenza tra le barre fuoriuscenti dei pilastri e quelle delle

**Foto 19** – Dettaglio di un nodo pilastro-fondazione prima del getto di collegamento



travi prefabbricate, sia longitudinali che trasversali, il problema è stato fondamentalmente di carattere geometrico e lo studio si è focalizzato sulle fasi di movimentazione e posa in opera degli elementi stessi per verificarne la reciproca compatibilità.

Le sollecitazioni flettenti sui pilastri prefabbricati possono ascrivere alla somma di due effetti:

- azione flessionale diretta innescata dalle due travi principali afferenti l'area di influenza del pilastro (interasse pilastri 4m);
- azione flessionale indiretta causata dalle altre due travi principali esterne ai pilastri e trasferita grazie alla rigidità torsionale della trave longitudinale completata.

Per quanto sopra, l'armatura del pilastro prevede il 50% di barre tese manicottate, quindi rese continue con quelle della soletta, ed il restante 50% viene portato fino in sommità dove svolge al contempo armatura necessaria alla parte a sezione ridotta sulla quale si collega la veletta.

Tale secondo 50% di armatura, nella sezione resistente alla quota intradosso impalcato, viene attivato grazie all'effetto composto dell'attrito e dell'aderenza superficiale all'interfaccia gettopilastro e grazie alla presenza di barre connettori, verticali e orizzontali, emergenti dal pilastro stesso.

La superficie che permette il trasferimento dell'azione suddetta (torcente per la trave longitudinale e flettente per

il pilastro) risulta efficacemente compressa per il trasferimento dello sforzo di scorrimento; la parte orizzontale è soggetta ai carichi verticali provenienti dall'impalcato e quella verticale soggetta al tiro delle barre manicottate.

I pannelli bi-lastra

Riguardo i vantaggi del sistema costruttivo semi-prefabbricato delle pareti in c.a., che prevede l'utilizzo dei pannelli bi-lastra, vale quanto detto per i pilastri nel paragrafo precedente.

I pannelli bi-lastra, però, hanno avuto bisogno di una maggiore cura e cautela in tutte le fasi di realizzazione, movimentazione, sollevamento, trasporto e posa in opera.

Tali elementi, considerate anche le ragguardevoli dimensioni dei pannelli (1.4x2.0x8.95m per circa 7 ton di peso), mancano dei requisiti di monoliticità che caratterizzano generalmente i prodotti tipici della prefabbricazione.

Nei primi esemplari realizzati, infatti, si è manifestata l'insorgenza di microfessure in corrispondenza delle zone di attacco del sistema di sollevamento; a tale problema si è ovviato aggiungendo una armatura di pelle fuori calcolo sulla faccia esterna delle lastre costituita da rete elettrosaldata Ø6mm con passo 10x10cm.

Nella g.a. di Pregnana sono stati impiegati fondamentalmente due tipi di pannelli bi-lastra:

- un tipo con lastre uguali, geometricamente simmetrico rispetto al piano medio, impiegato nel tratto a doppia canna;
- un tipo con lastre di altezza diversa impiegato nei tratti di g.a. a canna singola (foto 11 e 12).

In questo caso lo sbalzo aggettante superiormente della la-

stra esterna, utilizzato come sponda del getto della copertura, ha comportato una ulteriore complicazione costruttiva e una maggiore sensibilità dell'elemento alle operazioni di movimentazione.

Come già detto in precedenza la bilastro impiegata nella g.a. di Pregnana è di tipo "strutturale" e contiene al suo interno tutta l'armatura di forza necessaria alla parete ultimata per sopportare le sollecitazioni di servizio.

Tuttavia è stato necessario l'apporto di un'armatura integrativa, da posizionare in opera, in corrispondenza dei giunti tra pannelli contigui per conferire la totale monoliticità alla parete finita.

Tale armatura è costituita da una gabbia pre-assemblata, calata nella parete dopo il posizionamento dei pannelli, posta a cavallo dei giunti alle estremità dei pannelli stessi.

Anche nel caso della bi-lastra, come per i pilastri, il collegamento dei pannelli con la fondazione e con gli elementi di copertura, considerate le importanti azioni in gioco, ha necessitato di uno studio particolarmente approfondito.

## Il nodo bilastro-fondazioni

Il posizionamento in opera dei pannelli bi-lastra avviene calando gli elementi prefabbricati sulla fondazione (Foto 12) dove sono presenti le armature emergenti di spiccato.

Per evitare interferenze con l'armatura dei pannelli, i ferri d'attesa vengono posizionati in fondazione con l'ausilio di dime. Il collegamento della parete, realizzata con il sistema bi-lastra, alle fondazioni può essere considerato quindi a tutti gli effetti di tipo tradizionale ed equivalente a quello di una parete interamente gettata in opera.

Il trasferimento degli sforzi tra le barre di spiccato delle fondazioni con quelle di forza dei pannelli avviene, sostanzialmente, per sovrapposizione anche se, in considerazione dell'importanza e natura dell'opera, in fase di progetto sono stati presi in considerazione e verificati diversi sistemi di trasferimento delle sollecitazioni.



**Foto 20** – Dettaglio di un nodo traveparete durante il montaggio

### Il nodo bilastro-travi-soletta

Diversamente da quanto descritto per l'analogo nodo nel caso dei pilastri, il collegamento tra la parete della galleria e gli elementi di copertura ha presentato meno problemi. Questo è dovuto alle considerevoli dimensioni del nodo parete-copertura (1.4x2.2m) che ha permesso l'impiego di armatura integrativa in opera (Foto 20).

Limitatamente al caso della parete dei tratti a canna singola sono stati impiegati dei tralicci metallici, di produzione industriale (tipo Pittini), annegati nella parte sommitale della lastra esterna (sporgenti verso l'interno della parete).

La funzione di questi tralicci è stata quella di:

- irrigidire la parte a sbalzo della lastra esterna (quella avente funzione di cassero per il getto della soletta di copertura H=2.20m) e salvaguardarla da rotture durante le fasi di movimentazione;
- conferirgli l'adeguata resistenza e stabilità durante il getto della soletta di copertura;
- incrementare la capacità di trasferimento degli sforzi di trazione dalle barre della bilastro a quelle poste in opera in soletta.

### Cantierizzazione

Le opere del nodo di Pregnana sono state realizzate con la ferrovia e l'autostrada A4 in esercizio. Per i viadotti di linea e

per la galleria su la Linea Storica non vi sono state interferenze significative; solo quest'ultima ha richiesto il sostegno temporaneo del rilevato autostradale con una paratia in fase di realizzazione delle fondazioni. Per la galleria di scavalco della A4 l'interferenza è stata invece determinante per tutta l'impostazione progettuale ed il successivo svolgimento dei lavori. In tutte le fasi costruttive il gestore autostradale (SATAP) ha richiesto una sezione minima costituita da 2 carreggiate separate con 3 corsie da 3.33m verso Milano e 2 corsie da 3.5m verso Torino a fronte di una sezione ante-lavori costituita da 3+3 corsie di larghezza, oggi fuori norma, pari a 3.3 metri. Le fasi costruttive necessarie ad assicurare la sezione minima richiesta sono state le seguenti.

- Una fase, denominata zero, in cui sono stati realizzati i piedritti degli allineamenti esterni (fondazioni e pilastri) mantenendo il traffico sul sedime esistente. Questo è stato possibile in virtù del fatto che la nuova g.a. di Pregnana è già predisposta per il futuro allargamento a 4 + 4 corsie più emergenza (larghezza netta interna per ogni carreggiata pari a 22.5m) e quindi tali piedritti sono sufficientemente esterni alla sede precedente. Per realizzare gli allineamenti esterni è stato comunque necessario ricorrere al

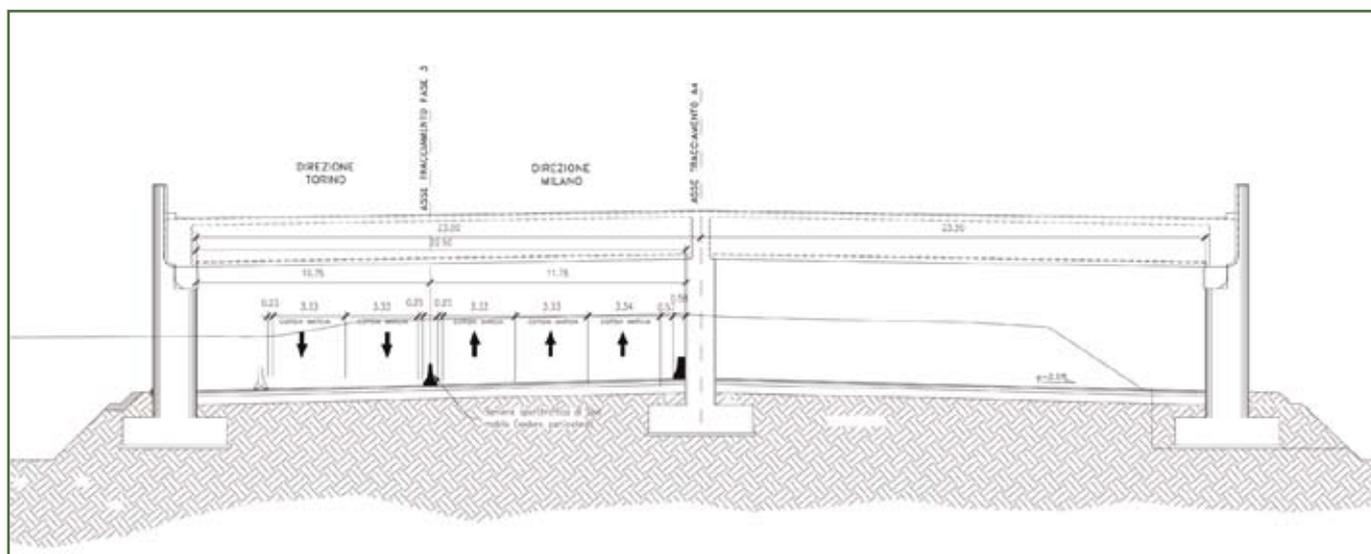


Foto 21 - Vista della carreggiata Sud durante la costruzione della g.a. (fase 2)

sostegno provvisorio degli scavi con palancole metalliche per raggiungere la quota fondazioni posta a circa 6 metri sotto il livello stradale.

- In prima fase si è allargato il sedime esistente a Nord (carreggiata Torino), rinterrando quindi le fondazioni ed i pilastri appena realizzati, e ricavando le 3+2 corsie richieste (Figura 4) tutte da que-

Figura 4 - Sezione trasversale durante la costruzione della g.a. in fase 1



sto lato in modo da spostarvi il traffico e poter lavorare sulla carreggiata Sud (Milano).

Questa è stata abbassata (3 metri circa) portando la livelletta fino alla quota definitiva grazie all'utilizzo, anche in questo caso, del sostegno prov-

visorio della carreggiata Nord con palancolato metallico posto in prossimità dell'asse autostradale.

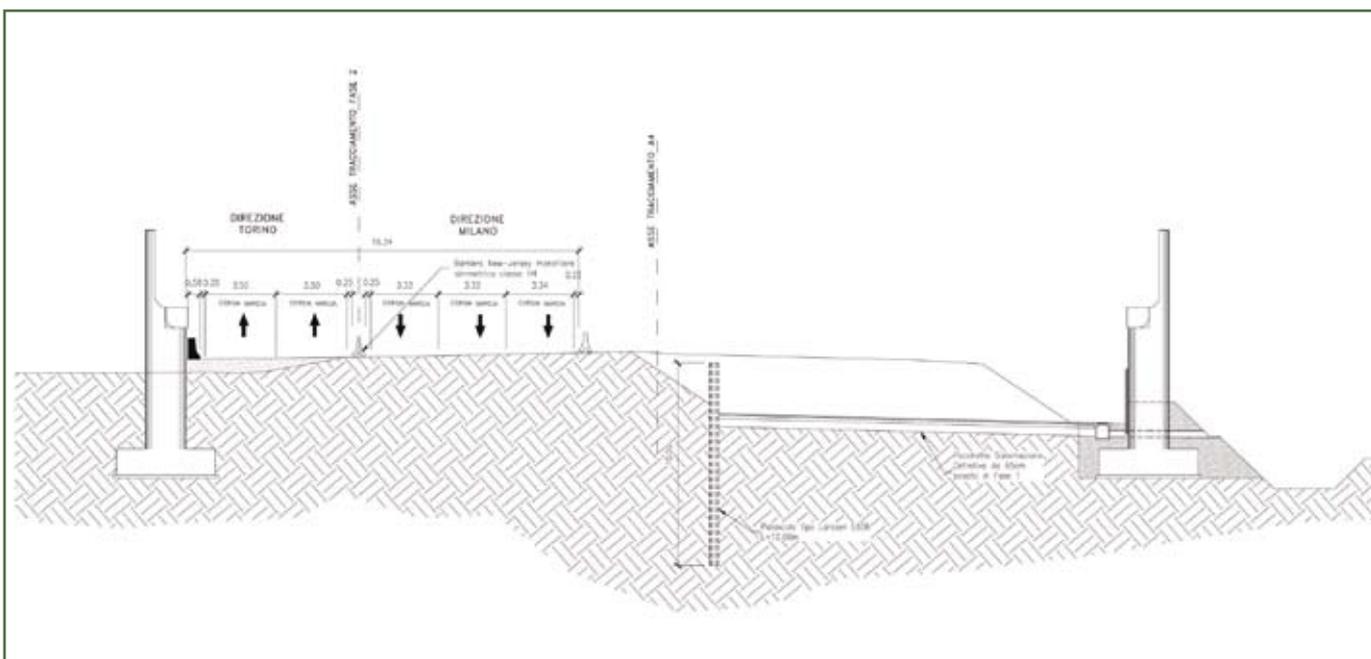
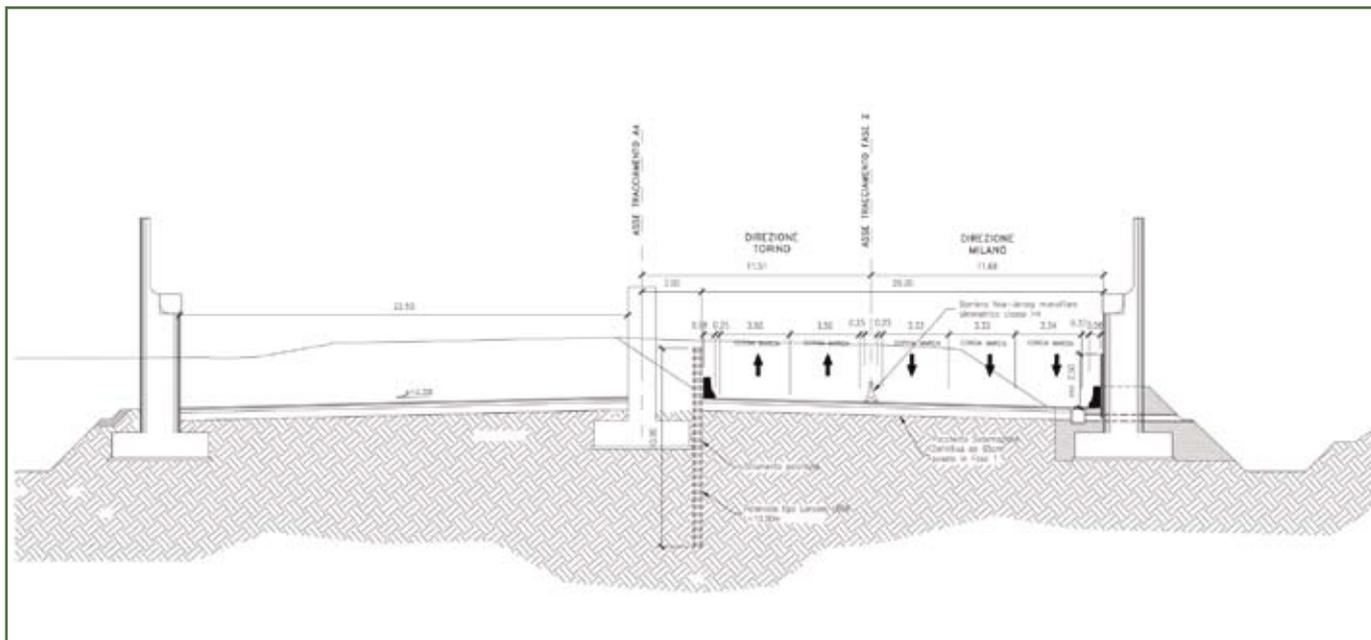
- Nella seconda fase il traffico è stato spostato sulla carreggiata Sud (Foto 21), già depressa fino alla quota definitiva, dove sono state ricavate le due carreggiate provvisorie da 3+2 corsie che, grazie all'utilizzo di un particolare new-jersey e di un apposito macchinario, è stato possibile destinare alle direzioni Torino o Milano secondo le necessità di traffico.

Con il traffico lato Sud è stata quindi scavata la carreggiata Nord, realizzato il setto centrale (fondazioni e muro centrale con bilastra) e quindi varate le travi di copertura (Figura 5).

- Nella terza e ultima fase il traffico è stato spostato nuovamente sulla carreggiata Nord, questa volta alla quota definitiva prevista dalla variante altimetrica, in modo da poter varare le travi della canna a Sud e quindi terminare la copertura della galleria (Figura 6 – Foto 22).

**Figura 5** - Sezione trasversale durante la costruzione della g.a. in fase 2

**Figura 6** - Sezione trasversale durante la costruzione della g.a. in fase 3



## Conclusioni

L'utilizzo di manufatti prefabbricati in c.a.p. per la realizzazione delle opere lungo la nuova linea AV Torino-Milano ha dato dei risultati molto positivi.

Tutte le volte che è stato possibile fare un confronto tra opere similari realizzate con getto in opera ovvero con prefabbricazione, tale confronto ha messo in evidenza l'estrema competitività della prefabbricazione.

Ulteriori margini di miglioramento per questo tipo di manufatti potranno essere ottenuti garantendo una o più delle seguenti condizioni:

- Una progettazione specifica per la prefabbricazione già dalle fasi iniziali di concezione e predimensionamento strutturale.

Questo permetterebbe di tener conto delle migliori caratteristiche meccaniche dei componenti, riducendone quindi dimensioni e pesi.

Si ricorda che le gallerie di Pregnana hanno le stesse dimensioni strutturali di opere similari gettate in opera con

tutta la differenza che questo comporta in termini di resistenza del conglomerato e tolleranze su i copriferri.

- Adozione di calcestruzzi fibro-rinforzati che, aumentando molto resistenza, tenacità e duttilità locale, rendono possibile l'ulteriore riduzione delle dimensioni e di fatto eliminano i problemi di fessurazione in fase di movimentazione e stoccaggio.

- Utilizzo di armature resistenti alla corrosione (ad esempio armatura zincata) la cui adozione permette di ridurre il copriferro e di lavorare a tassi maggiori in quanto si possono rilassare i limiti a fessurazione.

Per le opere appena descritte sulla linea AV Torino-Milano queste condizioni non si sono verificate in quanto la progettazione è iniziata nei primissimi anni '90 quando le tecnologie sopracitate erano ancora nelle fasi iniziali di sviluppo.

La grande apertura delle Ferrovie nell'accettare soluzioni prefabbricate

di linea anche dove questi sistemi industrializzati hanno richiesto l'adozione di soluzioni innovative o comunque mai utilizzate precedentemente in ambito ferroviario, apre però interessanti possibilità per un rapido sviluppo ed applicazione di queste tecnologie, non solo in ambito prettamente strutturale.

## Ringraziamenti

Si ringraziano per la preziosa e proficua collaborazione l'Ing. Francesco Magnorfi (TECNIMONT SpA) e l'Ing. Marco Orlandini (CONDOTTE SpA). ■

**Foto 22** – Vista dall'alto della g.a. di Pregnana in costruzione (fase 3)

