

“IL NODO DI PREGNANA”

Petrangeli M., Usai G., Magnorfi F., Orlandini M., Pietrantoni M. (2009)

“Questo articolo è stato pubblicato per la prima volta sulla rivista *Le Strade*, case editrice La Fiaccola srl, <http://fiaccola.it>”

“This article was first published in *Le Strade*, publisher: La Fiaccola srl, <http://fiaccola.it>”

“Cet article a été publié pour la première fois sur *Le Strade*, éditions : La Fiaccola srl, <http://fiaccola.it>”

“Este artículo se publicó por primera vez en la revista *Le Strade*, casa editorial : La Fiaccola srl, <http://fiaccola.it>”

Gallerie Artificiali

Il nodo di Pregnana

DUE GALLERIE ARTIFICIALI, DI GRANDI DIMENSIONI, SONO GLI ELEMENTI DI FORZA DELLO SCAVALCO DELL'ALTA VELOCITÀ FERROVIARIA TORINO-MILANO, CHE IN LOCALITÀ PREGANANA MILANESE SOVRAPPASSA LA LINEA STORICA E LA NUOVA CARREGGIATA AUTOSTRADALE, PER PORTARSI A NORD DEL TRACCIATO DELLA A4. LA PECULIARITÀ TECNOLOGICA DELLE GALLERIE RISIÈDE NEL TOTALE RICORSO - PER LA PRIMA VOLTA IN AMBITO FERROVIARIO - ALLA PREFABBRICAZIONE IN STABILIMENTO DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI POI SOLIDARIZZATI NEI NODI, CON IL SISTEMA DEL "GIUNTO BAGNATO".

Marco Petrangeli
Professor Ingegnere
Università "G. D'Annunzio"
Pescara

con:
Francesco Magnorfi
Ingegnere TECNIMONT SpA

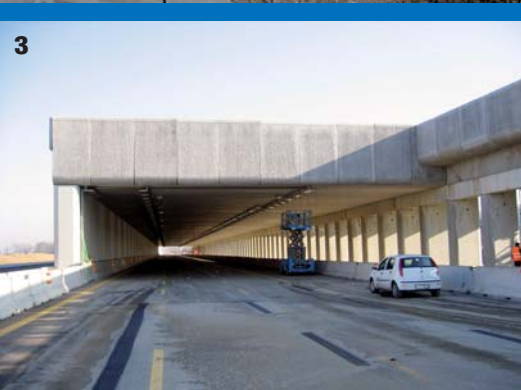
Marco Orlandini
Ingegnere CONDOTTE SpA

Massimo Pietrantonio
Ingegnere Geologo
INTEGRA Srl - Roma

Gaetano Usai
Ingegnere
INTEGRA Srl - Roma



Gallerie



1. Foto aerea del nodo di Pregnana

2. Vista interna della galleria artificiale sulla linea storica To-Mi

3. Imbocco lato Torino della galleria artificiale di scavalco A4 nel comune di Pregnana Milanese

Il tracciato della nuova linea ferroviaria ad Alta Velocità (AV) Torino-Milano corre 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 l'Autostrada (unico scavalco lungo l'intera tratta) spostandosi a Nord di quest'ultima (fig. 1). Una volta oltrepassata l'autostrada, la nuova ferrovia inizia l'ampia curva verso Sud-Est per entrare in Milano in affiancamento alla Linea Storica (LS).

Prima di oltrepassare l'Autostrada la nuova linea AV scavalca anche la Linea Storica che in questo tratto interseca l'A4 con un sottopasso posto circa un chilometro prima dello scavalco della linea AV.

In definitiva, per circa 4 chilometri, la nuova linea AV corre alta sul piano 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 corre invece su viadotti realizzati con travi in c.a.p. *standard* da 25 metri.

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

Per l'attraversamento della LS si è pertanto dovuto realizzare 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 sia sopra (AV) che sotto (LS) (fig. 2), la galleria di attraversamento autostradale ha una larghezza complessiva di quasi 50 metri (fig. 3) dovendo alloggiare al suo interno le due carreggiate autostradali già predisposte per la 4ª 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 (si veda IIC Gennaio 2007, vol. 827).

IDRAULICA E TRACCIAMENTO

Nonostante i grandi progressi della tecnica in ambito civile, le infrastrutture lineari restano tutt'oggi fortemente soggette al rischio idraulico, inteso sia come protezione da piene e inondazioni sia come gestione e smaltimento delle acque a seguito degli eventi pluviometrici più intensi. L'alluvione del 2000 in Piemonte ed in generale alcuni indicatori di cambiamento climatico hanno infatti spostato drasticamente le quote idrauliche di riferimento per la progettazione civile. Il nodo di Pregnana ed in generale tutti i lavori sul fascio infrastrutturale Torino-Milano sono stati fortemente influenzati da questo aspetto. Le quote di tracciamento della attuale A4 e della LS hanno infatti quote idrauliche considerate oggi troppo basse. Mentre per la LS si è deciso di non intervenire in quanto la sicurezza operativa è assicurata dalla nuova linea AV, per l'autostrada si è cercato, in concomitanza dei lavori sulla linea AV, di aumentare i margini di sicurezza modificando, dove possibile, la livelletta. Nel nodo di Pregnana i problemi idraulici sono acuiti dal fatto che il nodo presenta tre livelli infrastrutturali: in alto la linea AV, intermedia la A4, in basso la viabilità interferita (SP Bareggio-Pregnana) che sarebbe stato troppo impattante e anche diseconomico, portare sopra la linea AV. Con una livelletta ferroviaria ormai fissata nelle fasi precedenti di progettazione, gli scriventi hanno pertanto concentrato la loro attenzione sulle ottimizzazioni delle strutture ferroviarie che permettessero di sollevare quanto più possibile l'Autostrada A4 e la viabilità interferita. Per tutte e tre le opere si è, quindi, dovuto studiare attentamente il problema dello smaltimento delle acque come di seguito esposto.

Per quanto riguarda il livello più alto, ovvero quello della linea AV che corre sulla copertura della Galleria di Pregnana, il tema fondamentale è quello dello smaltimento delle acque della la piattaforma ferroviaria, considerati gli stringenti criteri imposti dalle Ferrovie e la notevole superficie (18500 m²) della copertura stessa. Onde evitare di realizzare pesanti ricariche non strutturali per ottenere le pendenze necessarie allo smaltimento delle acque, che determinano lo spessore complessivo della copertura e di conseguenza la quota autostradale, la copertura della galleria è stata realizzata con falde trasversalmente inclinate, a parità di franco utile per la A4, spioventi verso l'esterno. Questa impostazione assicura le pendenze minime richieste dalle Ferrovie, evita pesanti ricariche ed ottimizza la sagoma interna della galleria rispetto a quella della sezione autostradale sottostante, la quale essendo in ret-

tilineo è anch'essa conformata a tetto. Risolto il problema delle pendenze per lo smaltimento delle acque in copertura restava però il problema della pendenza longitudinale della livelletta ferroviaria, in questo tratto pari a circa 0.18%. Questa pendenza è stata ottenuta come segue. Nel tratto che va dal centro dell'opera (intersezione dell'asse ferroviario con quello autostradale) verso Milano, la livelletta scende automaticamente tracciando una diagonale lungo la falda Nord che è inclinata del 1.5% circa verso l'esterno. In altre parole l'inclinazione trasversale della copertura necessaria allo smaltimento delle acque fornisce automaticamente la pendenza longitudinale della livelletta la quale ricordiamo, incide planimetricamente l'asse della galleria con un angolo di 8°. Si ha infatti $1.5\% \times \sin 80 = 0.20\%$.

Nel tratto verso Torino, la linea scenderebbe invece lungo la falda Sud, anch'essa con pendenza verso l'esterno, e quindi la galleria è stata inclinata in senso longitudinale in modo da ottenere la pendenza longitudinale voluta.

Quindi abbiamo la parte della galleria verso Milano realizzata perfettamente in piano e la parte verso Torino realizzata invece con una pendenza longitudinale somma della pendenza dell'asse ferroviario più quella contrastante data dalla falda della copertura.

Questa configurazione è quella ottimale non solo per la gestione delle acque meteoriche in copertura ma anche per innalzare al massimo la quota autostradale sottostante a parità di livelletta ferroviaria e di spessore strutturale della copertura. Su di una lunghezza complessiva di 600 metri dell'opera si è recuperato circa 1 metro all'imbocco lato Torino rispetto ad una soluzione piana con ricariche. Questo metro di quota è stato utilissimo non solo per smaltire a gravità le acque di piattaforma dell'autostrada ma anche per ridurre il battente sulla galleria sottostante con cui la SP Bareggio-Pregnana interseca le due infrastrutture.

Se per quest'ultima opera il problema è stato quello della realizzazione dei lavori sotto falda e quindi della impermeabilizzazione strutturale ed infine della realizzazione del sistema di smaltimento delle acque meteoriche mediante vasche di accumulo e pompaggio, per l'autostrada il problema idraulico è ancora più severo in quanto la superficie di raccolta è enorme (piattaforma di oltre 20+20 metri) e la livelletta ha vertice concavo. Tutte queste acque devono quindi essere raccolte e smaltite a gravità sul reti-



4

colo idrografico esistente. In questo tratto, infatti, contrariamente a quanto avvenuto altrove, la livelletta dell'Autostrada è stata abbassata onde contenere la quota di quella ferroviaria sovrastante. Come richiamato in introduzione, nonostante tutte le ottimizzazioni progettuali, lo scavalco ha comunque comportato per la linea AV un tracciato di oltre 3 km in viadotto.

4. Vista della carreggiata Sud durante la costruzione della g.a. (fase 2)

La pavimentazione della variante autostradale

La pavimentazione utilizzata per la variante autostradale è di tipo flessibile con spessore totale di 65 cm.

A partire dagli strati superiori è così composta: manto di usura drenante di spessore pari a 4 cm; è stata adottata questa tipologia di manto in quanto trattasi di tappeti dotati di una elevata rugosità superficiale, sono drenanti e fonoassorbenti, permettono di fornire una buona aderenza anche in caso di pioggia e abbattano il rumore di rotolamento contribuendo in maniera elevata alla sicurezza stradale; strato di collegamento in conglomerato bituminoso dello spessore pari a 6 cm;

• strato di base in conglomerato bitumino-

so di spessore pari a 15 cm; fondazione ricavata da conglomerato bituminoso riciclato a freddo o in misto granulare stabilizzato a cemento dello spessore di 20 cm; fondazione in misto granulare stabilizzato a legante naturale di spessore 20 cm.

Oltre alla pavimentazione di progetto è stata prevista anche una pavimentazione provvisoria, sempre di tipo flessibile, ma con spessori ridotti.

Tale pavimentazione è stata utilizzata laddove si prevedeva la successiva demolizione, come ad esempio per gli allargamenti da eseguire durante le varie fasi di realizzazione del progetto. In questo caso lo spessore totale di 40 cm, sempre a par-

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. La galleria permette il passaggio al suo interno dell'autostrada A4 (luce netta per ogni carreggiata 22.5 m) e sostiene in quota il doppio binario della linea AV la cui velocità di progetto è pari a 300 km/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 conci iniziali (1 e 2) e finali (14-15) a "farfalla", i conci centrali (7-8-9) a doppia canna e quelli intermedi (3-4-5-6-10-11-12-13) 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 innesta, in retto, la nuova linea che corre da entrambi i lati in viadotto. I conci hanno lunghezza di 36.2 m e 40.2 m, ad eccezione di quelli posti all'inizio e alla fine che risultano di lunghezza pari a 55.6 m per il concio 1, 44.2 m per il concio 2 e 36.3 m per concio 15. La lunghezza complessiva dell'opera è pari pertanto a 592 metri. In corrispondenza della galleria, il tracciato ferroviario presenta un raggio planimetrico pari a 5500 m.

La copertura

La copertura della galleria è costituita da travi prefabbricate a T rovescio (fig. 5) in cemento armato ordi-

nario (H=1.95 m, B=1.0 m, L= 23.0 m) poste ad interasse di 1.0 m (accostate) sulle quali viene gettata in opera una soletta collaborante dello spessore di 25 cm. 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 (fig. 6). 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 50 cm 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 opera dello spessore di 80 cm. Per ottenere la pendenza longitudinale necessaria alla linea ferroviaria, come già discusso nel capitolo precedente, per il tratto "A" (canna singola imbocco lato Torino) sia l'impalcato che le fondazioni presentano la stessa inclinazione longitudinale pari allo 0.37%. Per il tratto "B" (canna doppia) presentano inclinazione longitudinale pari allo 0.17%. Per il tratto "C" (canna singola imbocco lato Milano) la 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. Questo progetto delle ricariche è stato effettuato mediante l'ausilio di un programma di tracciamento stradale a cui è stato dato, in luogo del terreno, il piano quotato dell'estradosso strutturale della galleria.

Le sottostrutture

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

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

tire dagli stati superiori è così composto: manto di usura drenante di spessore 4 cm; strato di collegamento in conglomerato bituminoso con spessore 6 cm; strato di base in conglomerati bituminoso pari a 10 cm di spessore; fondazione in misto granulare stabilizzato a legante naturale pari a 20 cm.

Le barriere

Le barriere utilizzate sono del tipo metallico a tripla onda bordo laterale di classe H2 per i rilevati minori di 2.5 m di altezza, mentre per rilevati di altezza superiore e sul lato ferrovia sono state utilizzate barriere metalliche a tripla onda bordo laterale di classe H3.

In prossimità delle opere d'arte minori presenti sul tracciato, quali tombini, sottopassi

ecc... le barriere metalliche bordo rilevato sono state sostituite con barriere metalliche a tripla onda bordo ponte classe H4. Le barriere utilizzate per lo spartitraffico centrale sono del tipo New Jersey monofilare classe H4 simmetrica e rinforzata.

Durante le fasi realizzative sono stati utilizzati dei New Jersey monofilari classe H4 bordo laterale per delimitare esternamente le carreggiate oltre ad un particolare elemento di barriera in calcestruzzo (fig. 4) che delimitava internamente le due carreggiate e che veniva rapidamente movimentato da una macchina per permetterne il facile spostamento di una intera corsia e così definire, secondo le esigenze di traffico, il numero di corsie da destinare a beneficio dell'una o l'altra direzione.



5

6



7

lonne circolari gettate in opera di 1.0 m di diametro poste ad interasse di circa 4.0 m.

I pilastri sono totalmente prefabbricati (figg. 7, 8); la solidarizzazione alla fondazione avviene per mezzo di un getto di seconda fase di calcestruzzo praticato all'interno di un'asola ricavata nella fondazione stessa. In corrispondenza di questa asola (ottenuta grazie all'impiego della lamiera stirata quale sponda impermeabile al getto ma perforabile dalle barre d'armatura) viene calato il pilastro prefabbricato che presenta 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 viene appoggiato sul plinto per mezzo di un sistema di sostegno provvisorio realizzato in carpenteria metallica e dotato di viti di regolazione (fig. 9).

Tale carpenteria metallica è agganciata ai pilastri con barre di precompressione che vengono infilate in fori passanti predisposti alla base di questi. Tra i pilastri esterni posti a 4 m di interasse, le travi di impalcato sono provvisoriamente sostenute da travi longitudinali prefabbricate solidarizzate ai pilastri con un getto di calcestruzzo. Successivamente al posizionamento delle velette prefabbricate di bordo si effettua il getto di completamento della trave longitudinale.

La bilastra (figg. 10, 11) è l'elemento prefabbricato per la realizzazione di pareti piene portanti costituito da una coppia di lastre parallele in cemento armato di piccolo spessore (nel caso in questione 8 cm), 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.

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. Tale criterio risponde anche alla necessità di garantire una procedura di cantiere sistematica, vista la scelta di prefabbricare gran parte della struttura.

È stata prevista una fondazione nastriforme continua di spessore pari a 1.30 m su pali trivellati di grande diametro ($\varnothing=1000$ mm) disposti su 3 allineamenti. La fondazione dei due allineamenti esterni al ciglio autostradale (pilastri) è larga 4.9 m, mentre quella dell'allineamento centrale (parete) è larga 4.8 m. I primi e gli ultimi due conci a farfalla della galleria hanno una fondazione diretta a platea con larghezza variabile.

Con i criteri prima esposti si è scelto per la tecnologia dei pali "ad elica continua con asportazione parziale del terreno", nota anche con il termine CFA ("continue flight auger"). Questa tecnologia prevede le seguenti fasi realizzative:

- 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'intorno 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;

5. Le travi principali della g.a. di Pregnana stoccate nel piazzale dello stabilimento di produzione

6. Le travi principali della g.a. di Pregnana prima del getto della soletta

7. Sollevamento di un pilastro prefabbricato della g.a. di Pregnana

8. Vista dei pilastri prefabbricati durante la costruzione della g.a. di Pregnana



8

- non necessita di opere di sostegno (tubo-forma o bentonite) 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, essendo in presenza di terreni sabbioso-ghiaiosi 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. Il valore del carico limite ottenuto con la cosiddetta tecnica di interpolazione iperbolica fornisce un Q_{lim} di 1344 t. 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 (σ'_v);

δ angolo di attrito tra terreno e superficie laterale del palo (nel caso in esame considerato $\delta = \phi$).

Il valore di $K=0.6$ adottato in prima analisi secondo le prescrizioni e le Linee Guida Italferr, si è rivelato eccessivamente cautelativo rispetto al valore di $K=1$ (con angolo di attrito del terreno di oltre 40°) che è necessario adottare per ottenere i valori trovati sperimentalmente. 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 ($\phi=36^\circ$) e aumentare il valore di K a 0.9, 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.

LA GALLERIA SULLA LINEA STORICA ED I VIADOTTI D'ACCESSO

La g.a. 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 per una lunghezza complessiva di 75 m circa. L'opera permette il passaggio al suo interno della ferrovia esistente e sostiene in quota il doppio binario della Linea AC di progetto.

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

L'impalcato è realizzato con travi prefabbricate a T rovescio (di altezza $H = 1.20$ m, larghezza 1.00 m e lunghezza $L = 14.20$ m) ad interasse pari ad 1.00 m. 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, longitudinale e trasversale, dell'estradosso è totalmente demandato al massetto armato che ha spessore variabile. Lo spazio fra le anime delle travi è riempito con get-

to in opera di completamento fino all'ottenimento di un solettone pieno dello spessore di 140 cm.

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

Le sottostrutture sono realizzate da:

- pilastri prefabbricati pseudo-rettangolari smussati (2.0x1.00m) posti ad interasse di 4.00m;
- pilastri circolari gettati in opera, di 1.00 m 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 1.0 m e altezza dalla fondazione di 3.4m.

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

L'impalcato ferroviario ha le seguenti caratteristiche:

- L = 14.0m (distanza netta in galleria tra i montanti),
- i = 5m (interasse binari),
- h = 1.20+0.20 = 1.40 m (altezza trave + soletta di completamento),
- it = 1.00 m (interasse travi).

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 su terreno trattato con colonne di jet grouting. Il trattamento è stato realizzato con colonne di diametro 1.10 m disposte a maglia, per quanto possibile regolare, 2.2 m x 2.8 m.

Prima, dopo e tra le due gallerie artificiali il lotto include 3 tratti in viadotto. Questi viadotti hanno impalcati di larghezza 13.6 m costituiti da 4 travi a cassone prefabbricate e pretese in stabilimento. L'interasse appoggi risulta pari a 22.6 m mentre la lunghezza delle travi vale 24.2 m.

Le travi sono alte 2.10 m mentre la soletta presenta spessore variabile da 30 cm (compresi 5 cm di predalle) ai bordi fino a 39.5 cm in mezzera.

Per quanto attiene il sistema di vincolo alla sottostruttura, ci sono 4+4 appoggi per ogni campata: un primo asse longitudinalmente fisso è costituito da due appoggi fissi-cedevoli disposti in corrispondenza delle travi centrali e due appoggi multidirezionali laterali; un secondo asse longitudinalmente mobile è costituito da tre appoggi multidirezionali ed uno unidirezionale. I giunti sono di tipo in gomma armata a piastra-ponte.

Le fondazioni sono state realizzate quasi ovunque su plinti direttamente appoggiati sui terreni sabbioso-ghiaiosi molto addensati che costituiscono la piana alluvionale. Solo in siti particolari, ad es. per la presenza di antiche cave riempite da materiale di riporto e in adiacenza alla galleria artificiale Bareggio-Pregnana, sono state adottate fondazioni profonde su pali di grande diametro.

DURABILITA' E MANUTENZIONE

Gli aspetti di durabilità e manutenzione sono stati curati con i seguenti accorgimenti:

- copriferrì adeguati e stringenti verifiche a fessurazione per tutti gli elementi contro terra e per quelli maggiormente esposti agli agenti atmosferici;
- qualità dei calcestruzzi e delle protezioni impermeabilizzanti;
- efficienza del sistema di smaltimento delle acque meteoriche;
- massima ispezionabilità nei limiti della struttura adottata;
- possibilità di accesso ed intervento sui giunti e sul sistema di smaltimento delle acque.

Dei punti precedenti può essere opportuno discuterne alcuni in maggior dettaglio.

Innanzitutto la realizzazione di pendenze strutturali omogenee affidate alle travi salvaguarda da possibili errori nella realizzazione del massetto pendenze e quindi da possibili fenomeni di ristagno d'acqua. Tutta l'enorme copertura è a pendenza costante pari al 1.5% .

Per quanto riguarda l'ispezionabilità si è adottata una soluzione che lascia un corridoio accessibile tra i conci sotto la linea di giunto in corrispondenza della raccolta delle acque meteoriche. Questo permette l'ispezionabilità delle travi più esposte, quindi per estrapolazione un controllo di quelle interne impacchettate con polistirolo espanso, e l'ispezione sia dei giunti che del sistema di smaltimento delle acque.

L'ispezionabilità permette inoltre di poter condurre la manutenzione ordinaria e straordinaria degli elementi (giunti e sistemi di drenaggio) che ragionevolmente saranno i soli a richiedere una manutenzione programmata in una struttura che altrimenti, in quanto monolitica, dovrebbe

9. Sostegno provvisorio dei pilastri prefabbricati con alla base i dispositivi di regolazione



10. Un pannello prefabbricato bilastra prima del montaggio

11. Dettaglio di un nodo trave-parete durante il montaggio



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 tratto Piemontese che in quella Lombarda.

I PILASTRI PREFABBRICATI

L'impiego di pilastri in c.a. interamente prefabbricati (figg. 7, 8, 9), per opere di tipo ferroviario

be assicurare diverse decine di anni di vita utile senza particolari interventi.

CANTIERIZZAZIONE

La realizzazione delle opere del nodo di Pregnana è stata chiaramente effettuata con l'autostrada A4 in esercizio. Per i viadotti di linea e per la galleria sopra la Linea Storica non vi sono state interferenze significative, solo quest'ultima ha richiesto il sostenimento temporaneo del rilevato autostradale con una paratia in fase di realizzazione delle fondazioni.

Per la galleria di scavalco della A4 l'interferenza è stata ovviamente 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 3.33 m verso Milano e 2 corsie da 3.5 m 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 22.5 m) e quindi tali piedritti sono sufficientemente esterni alla sede precedente. Per realizzare gli allineamenti esterni è stato comunque necessario ricorrere al 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 (fig. 12) tutte da questo lato in modo da spostarci il traffico e poter lavorare sulla carreggiata Sud (Milano). Questa è stata abbassata (3 metri circa) portando la li-

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:

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 1.0x2.0 m e altezza totale di circa 11 metri. Il peso è pari a circa 35 tonnellate.

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 (fig. 10), considerate anche le ragguardevoli dimensioni dei pannelli (1.4x2.0x8.95 m per circa 7 tonn. 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 agguinzando una armatura di pelle fuori calcolo sulla faccia esterna delle lastre costituita da rete elettrosaldata Ø6 mm con passo 10x10 cm. Come già detto in precedenza la bilastra 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.

velletta fino alla quota definitiva grazie all'utilizzo, anche in questo caso, del sostegno provvisorio della carreggiata Nord con palancolato metallico posto in prossimità dell'asse autostradale.

- Nella seconda fase il traffico è stato spostato sulla carreggiata Sud (fig. 5), 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 stato quindi scavata la carreggiata Nord, realizzato il setto centrale (fondazioni e muro centrale con bilastra) e quindi varate le travi di copertura (fig. 13).

- 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 (fig. 14).

CONCLUSIONI

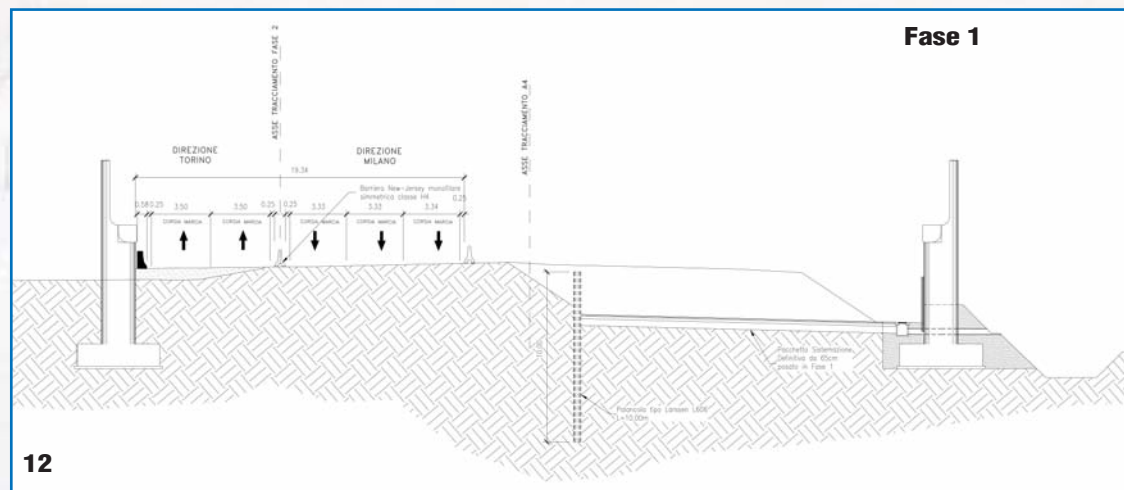
L'utilizzo di manufatti prefabbricati in c.a. e c.a.p. per la realizzazione delle opere lungo le nuove linee AV ha dato dei risultati molto positivi. Tutte le volte che è stato possibile fare un confronto tra opere similari realizzate con getto in opera ovvero con prefabbricazione, tale confronto ha messo in evidenza l'estrema competitività della prefabbricazione. Ulteriori margini di miglioramento per questo tipo di manufatti potranno essere ottenuti quando si verificassero una o più delle seguenti condizioni:

- una progettazione specifica per la prefabbricazione già dalle fasi iniziali di concezione e pre-dimensionamento 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.

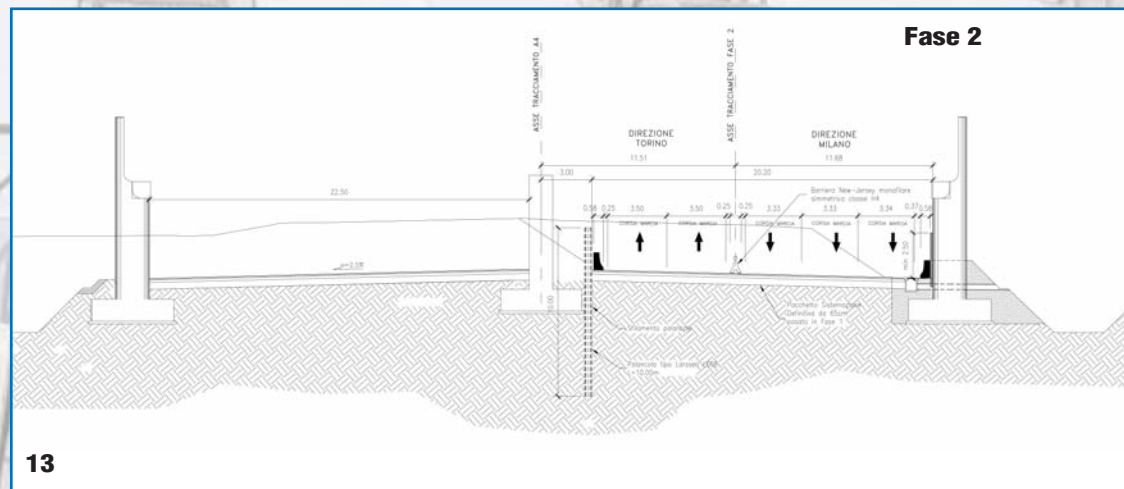
- adozione di calcestruzzi fibro-rinforzati che, aumentando molto resistenza, tenacità e duttilità locale, rendono possibile l'ulteriore riduzione delle dimensioni e di fatto eliminano i problemi di fessurazione in fase di movimentazione e stoccaggio.

- 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.

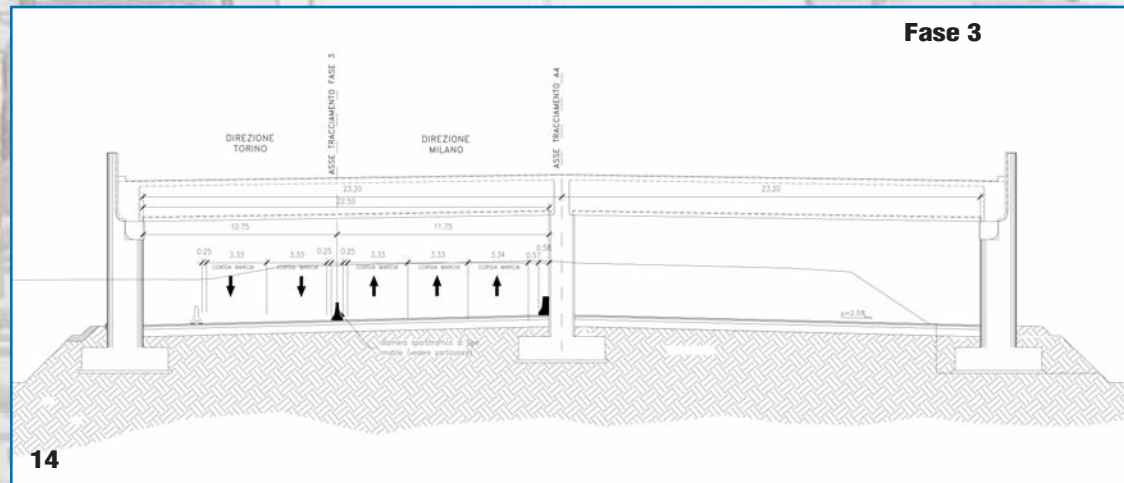
Per le opere appena descritte sulla linea AV Torino-Milano queste condizioni non si sono verificate in quanto la pro-



12



13



14

gettazione è iniziata nei primi anni '90 quando le tecnologie sopra citate 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. ■

12. Sezione trasversale durante la costruzione della g.a. in fase 1

13. Sezione trasversale durante la costruzione della g.a. in fase 2

14. Sezione trasversale durante la costruzione della g.a. in fase 3