

## Realizzazione di complessi sistemi di parcheggio sotterraneo in ambiente urbano – Il caso di Park San Giusto a Trieste – problematiche esecutive

Arch. Aldo Bellone<sup>(1)</sup>, Ing. Michele Bruga<sup>(1)</sup>, Geom. Romeo Bernacchi<sup>(1)</sup>, Ing. Giulia Grimaldi<sup>(1)</sup>, Dott. Giorgio Bringiotti<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Cipa S.p.A., Sorrento (NA), Italia

<sup>(2)</sup>GeoTunnel S.r.l., Genoa, Italia

**ABSTRACT:** La città di Trieste, come tanti centri urbani, soffre di una carenza di strutture dedicate alla sosta. Nasce quindi, nel 1996, l'idea di realizzare un parcheggio sotto il colle di San Giusto. La CIPA S.p.A. sta realizzando i lavori relativi al Tunneling, consistenti nell'esecuzione dello scavo e consolidamento del pozzo di ventilazione, del tunnel di ingresso, delle caverne, dei transetti, del tunnel pedonale e delle gallerie minori nonché l'esecuzione del rivestimento definitivo in calcestruzzo armato del pozzo, delle volte delle caverne e del tunnel d'ingresso. Le caverne sono lunghe circa 120 m per una sezione complessiva di circa 315 m<sup>2</sup>, da scavare in fasi successive, dove verranno realizzati i multipiano; sono previste diverse classi di consolidamento a seconda delle condizioni geologiche locali che si verificano durante lo scavo. Il pozzo di ventilazione ha una profondità di circa 63 metri ed un diametro di scavo di 9,60 metri ed è stato realizzato in sottomurazione, con campi di avanzamento di 2 metri. L'ubicazione dell'opera e le caratteristiche delle gallerie rendono quest'opera affascinante ma nello stesso tempo delicata, tale da richiedere attenzione e particolare competenza tecnica durante le lavorazioni. L'articolo illustra lo stato di avanzamento dei lavori analizzando le principali problematiche esecutive riscontrate.

### 1 Introduzione

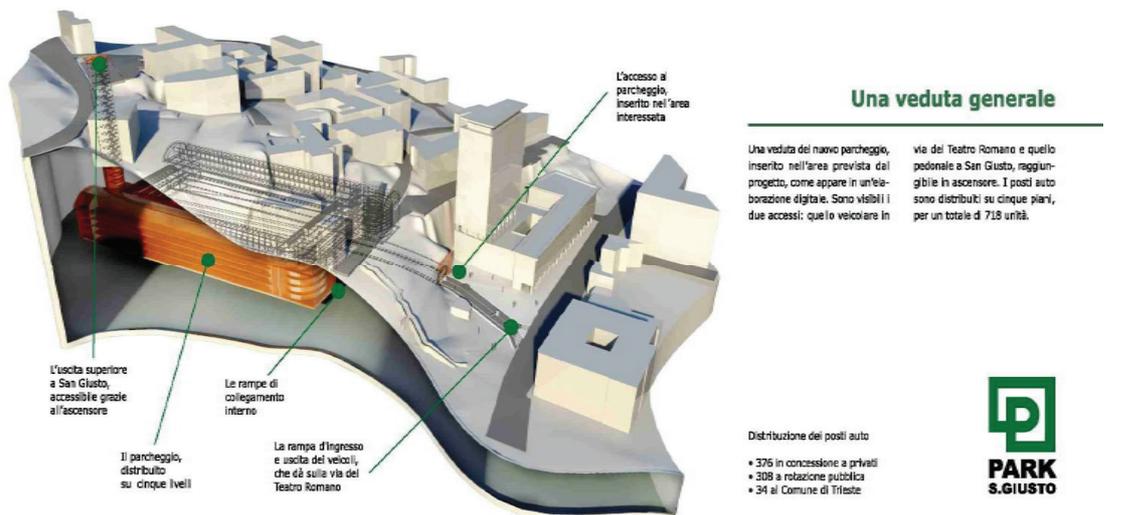
L'idea di realizzare un parcheggio sotto il colle di San Giusto nasce nel 1996 con una prima proposta tecnica presentata alla Pubblica Amministrazione di Trieste. Dopo uno studio di fattibilità ed a seguito di una proposta formale per la realizzazione dell'intervento in Project Financing, risalente al 2002, esperimento la prevista procedura di gara, viene data, nel 2005, la Concessione per la Progettazione, Costruzione e Gestione del parcheggio al soggetto “Proponente” (Oggi Park San Giusto S.p.A.). Il “Progetto”, da allora, per necessità geotecniche, ambientali, urbanistiche ed archeologiche, subisce sostanziali modifiche fino ad arrivare alla versione del Progetto Definitivo (2009) e successivamente, nel 2011, a quella finale del Progetto Esecutivo. La società di progetto Park San Giusto SpA ha proceduto all'affidamento interno dei lavori alle imprese costruttrici socie, dapprima riunite in Associazione Temporanea con RICCESI S.p.A., CARENA S.p.A., C.E.L.S.A. Soc. Coop., Arm Engineering S.p.A. e Mecasol S.r.l., che successivamente hanno costituito la Società consortile PIESSEGI S.c.r.l. La PIESSEGI S.c.r.l. ha affidato a sua volta alla CIPA S.p.A. i lavori relativi al Tunneling, tuttora in corso ed il cui stato di avanzamento verrà illustrato nel presente articolo.

### 2 Inquadramento del progetto

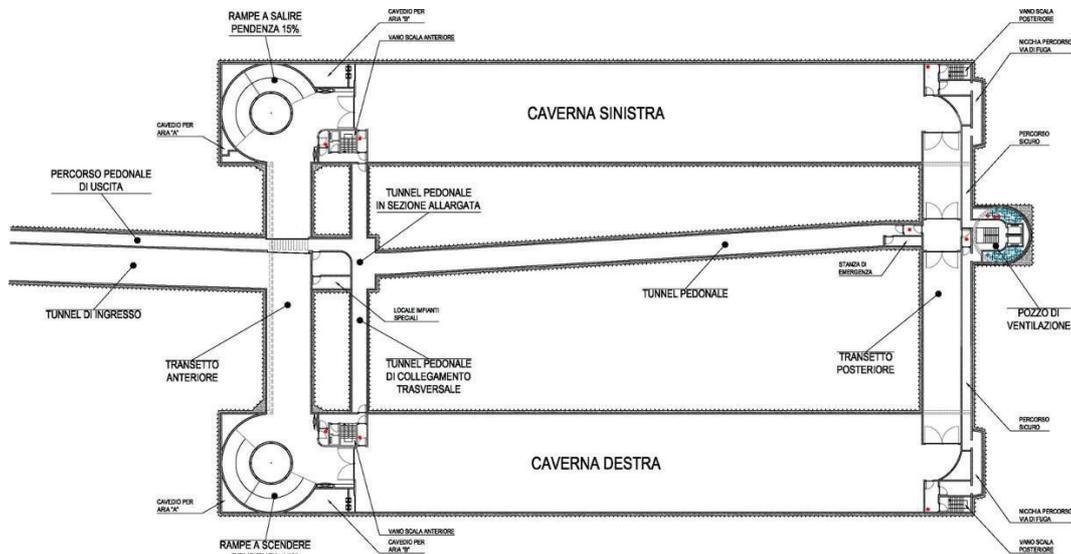
#### 2.1 Descrizione funzionale e architettonica – Struttura del parcheggio

Il volume individuato per la realizzazione del parcheggio interrato è quello posto sotto l'area in parte occupata dal “Seminario” e dal “Convitto delle Monache” presenti sulle pendici del colle di San Giusto. La struttura di parcheggio è completamente interrata, ed è costituita da due caverne con 5 livelli di parcheggio ognuna, di dimensioni 17x120x18m ciascuna. Le caverne sono collegate tra loro da due transetti per la viabilità degli autoveicoli e da gallerie verso le due uscite/accessi poste una in via del Teatro Romano (per automezzi e pedoni) e una sul Colle di San Giusto (per i pedoni) servita da due ascensori. All'interno delle due caverne, la soluzione proposta prevede due rampe a senso unico collegate da un transetto a doppio senso di marcia che collega i cinque livelli, necessari per arrivare ad una capienza di 718 posti con compartimenti tutti di area pari od inferiore a 1.500 m<sup>2</sup>. Dei cinque

livelli di parcheggio, uno (livello 0) si colloca 3 m più in alto rispetto alla quota di Via del Teatro Romano ed uno (livello +1) è posto alla quota di 9.40 m. Gli altri tre livelli sono realizzati a scendere fino alla quota -2,60 m. Tutti i cinque livelli sono a due a due intercomunicanti attraverso un transetto anteriore a doppio senso di marcia; i tre livelli "inferiori", destinati alla rotazione, sono collegati anche da un transetto posteriore di servizio, in aggiunta a quello anteriore, per una agevole circolazione ad anello. La viabilità interna è garantita da ampie corsie di larghezza pari a 5,50 metri, in corrispondenza di stalli e box, da percorrersi in senso unico antiorario ma più che sufficienti ed a norma ad accettare anche il doppio senso di circolazione. I transetti di collegamento sono larghi 8,20 metri. Le rampe a senso unico hanno raggio esterno di 8,00 metri e corsie di 4,50 metri di ampiezza. Le uscite pedonali sono servite da quattro vani scala di cui due con ascensori che portano ad un percorso pedonale che, in parte, funge anche da luogo sicuro in caso di incendio. L'accesso e l'uscita degli automezzi è previsto parte a cielo aperto e parte in galleria artificiale direttamente dalla via del Teatro Romano. Nella prima parte di tracciato sono previste le aree di accumulo prima della zona di ritiro automatico del ticket ed esazione. Il parcheggio è collegato con due ascensori al Colle di San Giusto, importante meta turistica della città. Gli accessi pedonali sono doppi; il principale da via del Teatro Romano segue un percorso isolato da quello veicolare lungo la galleria di ingresso; il secondo accesso è collocato, contrapposto, nella parte posteriore e porta direttamente alla sommità del Colle di San Giusto per un accesso diretto al sito archeologico tramite due ascensori.



**Figura 1. Una veduta generale del nuovo parcheggio, inserito nell'area prevista dal progetto, come appare in un'elaborazione digitale. Sono visibili i due accessi: quello veicolare in via del Teatro Romano e quello pedonale a San Giusto, raggiungibile in ascensore. I posti auto sono distribuiti su cinque piani, per un totale di 718 unità**



**Figura 2. Planimetria generale di progetto del parcheggio**

## 2.2 Inquadramento geologico - geotecnico generale

La determinazione della natura geo-morfologica dell'area in oggetto è avvenuta con consultazione di analisi già effettuate presenti in letteratura, riguardanti l'intero territorio di Trieste, e per mezzo di una serie di campagne di indagini geognostiche, a partire dal 1996, consistite in sondaggi a carotaggio continuo fino a profondità massime di 50 m, prove di permeabilità, prelievo di campioni e relative analisi di laboratorio, rilevamenti geomeccanici in foro e di superficie, rilievi BHTV e geofisici in foro.

La zona interessata dallo studio è ubicata nel centro cittadino di Trieste, in corrispondenza del Colle di S. Giusto, tra via del Collegio, Androna San Saverio, via delle Monache, Piazza San Cipriano e via della Cattedrale. Il "territorio" interessato è posto al passaggio tra la "struttura embriata della Ciceria" (zona di faglie vicarianti della "Linea di Palmanova") ed il "Thrust di Koper" che segue a Sud.

Per la maggior parte l'area è interessata dall'affioramento di rocce sedimentarie clastiche stratificate, tutte riferibili alla formazione del flysch. Si tratta di una formazione di età Eocenica costituita da marne e arenarie regolarmente variabili: le arenarie normalmente sono di spessore variabile da alcuni centimetri al metro, le marne da alcuni millimetri a 40-50 centimetri. Nella provincia di Trieste questa ripetizione ritmica di arenaria e marna è variabile nelle diverse località sia per quanto riguarda le potenze individuali dei due litotipi che per il rapporto percentuale di un litotipo sull'altro. Ciò è riscontrabile anche in zone non molto estese ed è spesso accompagnato da notevoli fenomeni di tettonizzazione, che hanno ulteriormente complicato una geologia condizionata da notevoli variazioni di facies (cioè dalle complesse morfologie dell'ambiente di bacino in cui andavano depositandosi i sedimenti marnosi arenacei).

La massa rocciosa nel suo insieme è da considerarsi semipermeabile, di discrete caratteristiche fisico meccaniche anche se, date le caratteristiche petrografiche, fisiche, chimiche ed idrogenetiche può presentarsi in volumi particolarmente tettonizzati (strette pieghe, piani di faglia, scivolamenti interstrati o pieghe-faglie) e la buona caratterizzazione generale può anche scadere notevolmente.

L'assetto strutturale è abbastanza complesso, anche se la sua complessità deriva più dalla naturale plasticità d'insieme della formazione flyschoidale che da linee tettoniche accertate. Il motivo tettonico principale nell'area consiste in una piega sinclinale ad ampio raggio (con debole curvatura) con asse ad orientazione dinarica NW-SE con immersione in questa direzione, mentre l'assetto locale riferito al colle di San Giusto risulta interessato da una serie di faglie vicarianti, anch'esse con orientamento dinarico.

La formazione, indagata in profondità a -50 metri dal piano campagna e su un'area vasta, si presenta con configurazione e caratteristiche molto variabili. Da affioramenti con potenti spessori di prevalenti banchi di arenaria tenace alternata a sottili livelli di marne poco stressate, si passa a livelli prevalentemente marnosi fortemente tettonizzati.

## 2.3 Principi della progettazione strutturale e fasi di lavoro previste

Concettualmente il progetto prevede un diffuso consolidamento primario dei volumi di scavo con chiodatura della roccia e tiranti attivi legati ad un rivestimento in spritz-beton armato anche con centine reticolari.

Il consolidamento primario comprende tutti gli elementi installati nel profilo definitivo per raggiungere la stabilità dello scavo durante il periodo della costruzione, come spritz-beton e centine, rete di armatura, ancoraggi in roccia ecc.. Tutti gli elementi del consolidamento primario devono restare in situ e divenire parte delle opere definitive. Per le volte delle caverne è prevista un'ulteriore struttura in calcestruzzo armato con funzione portante. Al termine degli scavi e del consolidamento primario, è prevista la realizzazione delle strutture interne del parcheggio (platea, rivestimento definitivo, solai rampe ecc.)

La classe di consolidamento è calcolata secondo gli standard austriaci ÖN B 2203-1. L'applicazione della classe di consolidamento deve essere stabilita sul posto, in ragione delle condizioni locali incontrate nel corso dello scavo. Una specifica classe di consolidamento è rappresentata da due numeri. Il primo numero di riferimento dipende dalla massima lunghezza di scavo consentita prima dell'installazione del consolidamento primario ed il secondo numero di riferimento dipende dalla quantità degli elementi di consolidamento primario da installare relativamente ad una lunghezza di scavo pari a un metro.

Trattandosi di opere da realizzare in ambito urbano, non si prevede l'utilizzo di esplosivo durante le fasi di scavo, per problematiche che, pur se di carattere prevalentemente "psicologico" nei confronti della popolazione, risultano difficilmente superabili a livello autorizzativo. Pertanto si procederà con lo scavo con sistemi meccanici mediante martello demolitore classico e/o con fresa puntuale. Il ciclo completo di avanzamento prevede: lo scavo per una lunghezza compatibile con le condizioni geologiche locali presentatesi e con la classe di consolidamento prevista dal progetto; il rilievo fotografico e descrittivo del fronte; la posa del pre-spritz per uno spessore di circa 5 cm; la posa della rete elettrosaldata di prima fase (garantendo una sovrapposizione dei fogli di almeno 20 cm, sia trasversalmente che longitudinalmente); la posa della centina e delle relative catene; il rilievo della centina (verifica di piani e mezzerie e degli eventuali sovrascavi); la posa dello spritz beton di prima fase per uno spessore di 17 cm; la perforazione, posa in opera e iniezione della chiodatura prevista da progetto; la posa della piastra e dei dadi ad ogni chiodo; la posa della rete elettrosaldata di seconda fase (garantendo sempre la sovrapposizione); la posa dello spritz beton di finitura o di seconda fase, per uno spessore di 8 cm, per un pacchetto di rivestimento di spessore complessivo di 30 cm.

### 3 Stato dell'opera e problematiche esecutive riscontrate

#### 3.1 Cantierizzazione

Per l'esecuzione dei lavori sono state individuate due aree distinte in corrispondenza dei due fronti di avanzamento previsti:

-area di cantiere "A", in via del Teatro Romano a quota +5.00 m s.l.m., dalla quale sono eseguiti gli scavi del tunnel d'ingresso, delle caverne, dei transetti e del tunnel pedonale;

-area di cantiere "B", in via Rota a quota +60.60 m s.l.m., dalla quale è stato eseguito lo scavo e il rivestimento del pozzo di ventilazione.

L'area A rappresenta il centro nevralgico del cantiere: sono stati installati gli uffici di cantiere, gli spogliatoi e i servizi igienici per le maestranze, l'officina elettrica e meccanica, il deposito temporaneo del materiale di scavo, le infrastrutture necessarie per l'alimentazione elettrica, la stazione di ventilazione e i serbatoi per l'accelerante di presa e per il carburante. Nello stesso spazio sono inoltre individuate alcune piccole aree per lo stoccaggio dei materiali e delle attrezzature necessarie per l'esecuzione dei lavori.

Nell'area B è stata montata una gru a torre a servizio del pozzo e il limitato spazio residuo è utilizzato come area di stoccaggio temporaneo dei materiali prima del loro spostamento e utilizzo in area A.

Uno degli aspetti sicuramente più problematici riscontrato durante l'esecuzione dei lavori, soprattutto in area A, è rappresentato dalla gestione dei flussi di traffico all'interno dell'area di cantiere; più volte in particolari situazioni di congestionamento del piazzale (dovute anche solo alle operazioni di scarico di un articolato) si è costretti a rallentare se non interrompere e/o posticipare intere fasi lavorative come l'esecuzione di uno scavo di avanzamento o di un getto.

Per assoluta mancanza di spazio non è stato possibile installare, come inizialmente previsto, un impianto automatico per il lavaggio degli pneumatici delle autobetoniere; questo comporta quotidianamente la necessità di sottoporre le stesse ad un lungo e oneroso lavaggio manuale al termine di ogni singolo scarico.

Ancora, non essendo possibile procedere con il trasporto dello smarino dal fronte di scavo direttamente al sito di destino definitivo (la sezione ridotta delle caverne non permette l'accesso in sotterraneo di mezzi transitabili su strada) è stato necessario realizzare un'area per il deposito temporaneo che occupa una grossa porzione di piazzale (la capacità peraltro deve essere tale da potervi depositare il materiale scavato nel fine settimana, quando non è permesso il transito su strada degli autocarri).

La limitata capacità delle aree di stoccaggio impone inoltre una gestione "just in time" dell'approvvigionamento dei materiali da costruzione: nel piazzale possono essere scaricati e stoccati solamente i materiali (centine, rete elettrosaldata, barre di acciaio per chiodatura e armatura ecc...) che saranno posati nelle ore immediatamente successive.

Salvo casi sporadici, tutte le macchine e attrezzature impiegate nelle lavorazioni devono essere collocate all'interno delle gallerie, anche nel caso in cui rimangano inattive per un lungo periodo (come

pure tutti gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria devono essere eseguiti in sotterraneo in spazi ristrettissimi).

La situazione sopra descritta ha rappresentato e rappresenta ogni giorno una forte limitazione per la continuità delle lavorazioni e richiede un grosso sforzo organizzativo da parte dello staff tecnico per limitare il più possibile i disagi.



**Figura 3. - 4. Una veduta generale delle due aree di cantiere: a sinistra l'area di via del Teatro Romano durante il lavaggio dell'autobetoniera (sullo sfondo il deposito temporaneo dello smarino); a destra l'area di via Rota durante i lavori di scavo del pozzo.**

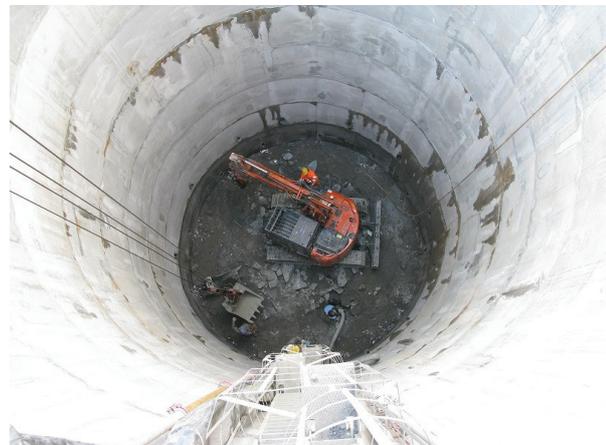
### 3.2 Scavo e rivestimento del pozzo di ventilazione

Il Pozzo di Ventilazione (PV) collega il transetto posteriore con la superficie sul Colle di San Giusto, tra via del Castello e via Rota e conterrà molteplici servizi comprese le scale, due ascensori, i condotti di ventilazione e di estrazione dell'aria. Ha una profondità di circa 63 metri e un diametro di scavo di 9,60 metri ed è stato realizzato in sottomurazione, con campi di avanzamento di 2 metri.

Lo scavo del singolo concio è stato eseguito con escavatore cingolato girosagoma munito di martello demolitore del peso di 12 q.li e contemporaneo smarino del materiale di scavo mediante benna auto-scaricante estratta per mezzo di una gru a torre montata in superficie. Terminato lo scavo di ciascun campo, dopo la posa di una membrana drenante lungo il perimetro, veniva calata all'interno dello scavo e posata in opera prima l'armatura e successivamente la cassaforma circolare, per poi procedere con il successivo getto di calcestruzzo per il rivestimento definitivo. Tolta la cassaforma, si procedeva allo scavo del successivo campo di avanzamento, operazione durante la quale si scoprivano le tratte dei ferri di armatura precedentemente affogate nella sabbia e che costituivano i ferri di ripresa per l'armatura del successivo concio.



**Figura 5. (sx) Posa dell'armatura e cassatura del concio d'attacco**



**Figura 6. (dx) Una veduta dall'alto del pozzo durante la fase di scavo**

I lavori di esecuzione del PV sono ad oggi completati ed hanno richiesto 8 mesi di lavoro, con scavi e rivestimenti concentrati su di un unico turno nell'arco delle 24 ore. Le condizioni particolarmente

favorevoli dell'ammasso roccioso riscontrate durante l'avanzamento hanno permesso di procedere direttamente con l'esecuzione del rivestimento definitivo senza rendere necessaria la posa di alcun sostegno provvisorio (spritz beton, centine o ancoraggi).

### 3.3 Scavo del tunnel d'ingresso e del transetto anteriore

Il Tunnel di Ingresso (TI) inizia dal portale in via del Teatro Romano, arriva al transetto anteriore, ed è lungo circa 42 metri, con una sezione di scavo di 47 m<sup>2</sup> e pendenza media del 2.2%; sarà percorso sia dai veicoli sia dai pedoni, e sarà utilizzato anche per la ventilazione.

Il Transetto Anteriore (TA) collega tutti e cinque i livelli della caverna destra e sinistra; inoltre la parte superiore è utilizzata per la ventilazione. E' lungo circa 74 metri (dei quali 9 m circa di intersezione con il TI), per una sezione complessiva di circa 135 m<sup>2</sup>, da scavare in fasi successive: una prima sezione di scavo della calotta di circa 48 m<sup>2</sup> ed i successivi ribassi in cinque fasi diverse.

Lo scavo del TI è stato eseguito a piena sezione adottando una classe di consolidamento con sfondi di 1,00 m, posa di centina reticolare, consolidamento della roccia con chiodatura passiva (n. ro 6/7 chiodi in barra piena fi 25 da 6 m) legata ad un rivestimento in spritz-beton armato con rete elettrosaldata eseguito in tre fasi successive.

Complessivamente i lavori di scavo del TI hanno richiesto 65 giorni di lavoro su due soli turni (dalle 6.00 alle 22.00) con una produzione media giornaliera di 0,65 m. La grossa limitazione che ha impedito di conseguire produzioni maggiori è stata proprio quella dell'orario di lavoro; lo svilupparsi delle lavorazioni in prossimità dell'imbocco rendeva infatti impraticabile l'esecuzione di alcuna attività durante l'orario notturno al fine di limitare l'impatto acustico sulla popolazione.

Un'altra problematica incontrata è stata l'interferenza di un cunicolo esistente (utilizzato come rifugio durante il periodo bellico) con il tracciato del TI (e in seguito con quello del TA e delle caverne), che ha richiesto precedenti lavori di riempimento con calcestruzzo magro e materiale di riporto; la presenza del cunicolo ha inoltre fortemente rallentato le operazioni di iniezione dei chiodi interferenti a causa della necessità di riempire i macrovuoti formati a tergo del vecchio rivestimento per rilassamento del cavo.



Figura 7. (sx) Interferenza di un cunicolo esistente e di un pozzo durante lo scavo del TI



Figura 8. (dx) Vista d'insieme del TI

Terminato lo scavo del TI, si è proceduto poi con quello del TA il quale è avvenuto lungo due fronti, prima solo quello di sinistra, per poi partire anche con quello di destra non appena ricavato lo spazio per l'alloggiamento delle macchine necessarie.

La classe di consolidamento adottata è stata quella con sfondi a piena sezione di 1,30 m, posa di centina reticolare, perforazione e posa di n. ro 4/5 chiodi passivi in barra  $\Phi$  25 della lunghezza di 6 m in calotta, perforazione e posa di n. ro 4 chiodi passivi in barra piena fi 32 della lunghezza di 12 m sui piedritti e rivestimento in spritz beton dello spessore complessivo di 30 cm armato con rete elettrosaldata ed eseguito in 3 fasi (pre-spritz prima della posa della centina, spritz di prima fase prima della perforazione dei chiodi e spritz di seconda fase). Inoltre in corrispondenza dell'intersezione del TA con le caverne è stato eseguito un preconsolidamento del fronte con chiodature in VTR della lunghezza di 8 m.

Complessivamente i lavori di scavo del TA hanno richiesto 60 giorni di lavoro su tre turni 24 h/24 h con una produzione media giornaliera di 1,10 m. Il progressivo allontanamento dall'area d'imbocco nonché il conseguente aumento dei valori di copertura ha permesso infatti un potenziamento dei turni di lavoro pur rimanendo il vincolo dell'orario diurno (dalle 6.00 alle 22.00) per le attività con maggiore impatto acustico (scavo, smarino e perforazione dei chiodi). Inoltre il completamento dello scavo del TI e dei primi 5/10 m di avanzamento del TA ha comportato un sostanziale incremento degli spazi disponibili in sotterraneo permettendo uno svolgimento dei flussi di traffico molto più agevole con conseguente incremento della resa.

La dotazione di macchine per i lavori di scavo e rivestimento del TI e del TA consisteva in un escavatore cingolato del peso di 240 q.li dotato di martello demolitore, una pala gommata e due minidumper per lo smarino, una pompa spritz, un jumbo bullonature monobraccio per le perforazioni dei chiodi e degli infilaggi, una stazione d'iniezione della miscela cementizia ed un sollevatore con pinza posa centine, gancio e cestello per l'esecuzione di tutti i lavori in quota (posa della centina reticolare, posa e iniezione dei chiodi).

### 3.4 Scavo e rivestimento delle caverne (calotte)

Le due caverne, destra (CD) e sinistra (CS), costituiscono il volume essenziale della struttura di parchemento all'interno del quale saranno realizzati cinque livelli di parcheggio tra di loro collegati per mezzo di rampe circolari, collocate nella parte anteriore delle caverne stesse. Le caverne hanno una lunghezza di circa 120 m, una larghezza di 17 m e un'altezza di 18 m, per un volume complessivo di circa 75.000 m<sup>3</sup>, da scavare in fasi successive: una prima sezione di scavo della calotta di circa 98 m<sup>2</sup>, ed i successivi ribassi in quattro fasi diverse.

Terminato lo scavo del TA, prima di procedere con lo sfondo della calotta delle caverne, è stato eseguito un campo di chiodature integrative nei tratti in intersezione con il transetto stesso costituito da n. ro 96 chiodi  $\Phi$  32 della lunghezza di 8 m per la CS e numero 76 chiodi per la CD. Questo ha permesso di procedere in completa sicurezza con il taglio dei piedritti delle centine del TA.

Lo scavo delle due porzioni di calotta, ad oggi terminato, è stato eseguito in contemporanea sui due fronti e ha richiesto 152 giorni per la CS (0,80 ml/giorno) e 163 giorni per la CD (0,75 ml/giorno).

La sezione di consolidamento tipica utilizzata in CS è stata quella con scavo a sezione corrente con sfondi variabili da 1,00 e sino a 1,30 e consolidamento primario costituito da una centina reticolare, un pacchetto di spritz beton dello spessore di 30 cm armato con rete elettrosaldato e raggiera costituita da n. ro 12/13 chiodi in barra piena fi 25 della lunghezza di 8 metri.

In CD l'intercettazione nel tratto iniziale di un ammasso roccioso con caratteristiche geotecniche decisamente scadenti (volume tettonizzato per la presenza di un piano di faglia), unito al verificarsi di fenomeni deformativi superficiali importanti (subsidenze), ha richiesto l'adozione, per i primi 40/50 m di avanzamento, di una sezione di consolidamento più cautelativa con sfondi variabili tra 50 e 100 cm e raggiera costituite da n. ro 16/17 chiodi in barra piena fi 25 della lunghezza di 12 m.

Inoltre, nel tratto adiacente all'intersezione con il TA (per una lunghezza di circa 10 m) si è resa necessaria l'esecuzione di un pacchetto integrativo di spritz beton armato con rete elettrosaldato dello spessore di 40 cm, realizzato in sottospessore a distanza di alcune settimane dall'esecuzione dello scavo.

La necessità di procedere per esigenze di cronoprogramma con lo scavo d'avanzamento in contemporanea delle due caverne, ha trovato contrasto con il difficile contesto ambientale caratterizzato da limitazione sia degli spazi sia degli orari di lavoro (dalle 22.00 alle 6.00 permane il divieto di eseguire lavorazioni rumorose come lo scavo e la perforazione dei chiodi).

La lavorazione più critica si è rivelata sicuramente quella dello scavo e smarino: poiché l'unico percorso possibile per il trasporto del materiale era il TI e a causa della limitata capacità del deposito temporaneo, si è riscontrata sin dai primi giorni di scavo l'impossibilità ad eseguire la lavorazione in CD e CS nelle stesse ore. Per questo motivo si è stati costretti ad attuare turni di scavo alternati tra una caverna e l'altra con conseguente necessità di eseguire all'interno delle 16 ore due scavi e due campi di chiodi con le stesse maestranze. Durante le otto ore di orario notturno erano invece eseguite tutte le altre lavorazioni necessarie per l'esecuzione del rivestimento primario (posa della rete elettrosaldato, della centina, dello spritz beton e iniezione dei chiodi).

Interessante osservare come le limitazioni all'entità della lunghezza massima del singolo sfondo non sempre sono state determinate dalle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso (soprattutto in CS e nella parte terminale della CD), ma spesso dalla necessità di chiudere il ciclo di scavo e perforazione sulle due caverne all'interno delle 16 ore.

Nonostante non fosse possibile la sovrapposizione temporale dei lavori di scavo nelle due caverne, si è preferito dotare i due fronti di lavoro di corpo macchine autonomo, questo per limitare difficoltosi e dispendiosi spostamenti delle macchine stesse da una caverna all'altra. Ciascun fronte di lavoro era quindi dotato di un escavatore cingolato del peso di 350 q.li con martello demolitore, una pala gommata e due minidumper per lo smarino, una pompa spritz, un jumbo bullonature bi-braccio per le perforazioni dei chiodi, una stazione d'iniezione della miscela cementizia ed un sollevatore con pinza posa centine, gancio e cestello per l'esecuzione di tutti i lavori in quota (posa della centina reticolare, posa e iniezione dei chiodi).



**Figura 9. (sx) Fase di smarino in caverna destra**

**Figura 10. (dx) Innesto tra il tunnel di ingresso, il tunnel pedonale ed il transetto anteriore lato sinistro**

Terminati gli scavi il progetto prevede di eseguire, prima di procedere con i ribassi delle caverne, il rivestimento definitivo delle calotte costituito da una struttura in calcestruzzo armato composta da due travi perimetrali e da una volta.

Le travi hanno una sezione rettangolare di circa 1,20 m x 1,30 m e vengono eseguite in opera previa posa di gabbie di armatura preassemblate. Prima di procedere con il getto della volta le travi vengono ancorate lungo tutto lo sviluppo della caverna con dei tiranti attivi a 6 trefoli posti a interasse 1,50 m e della lunghezza di 18 m (nel getto della trave vengono lasciati dei risparmi entro i quali verranno alloggiati le piastre di ancoraggio e sulle gabbie preassemblate è collocata l'armatura di frettaggio e di distribuzione dei carichi puntuali).

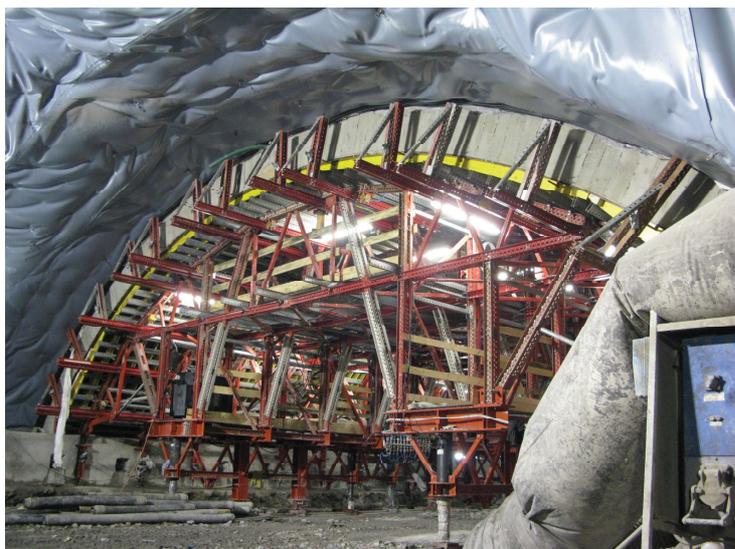
Terminati i lavori di tirantatura viene posato il pacchetto impermeabilizzante della volta costituito dall'accoppiamento di un TNT del peso di 500 kg/m<sup>2</sup> con uno strato di pvc dello spessore di 2 mm. Lungo la superficie di estradosso della trave, a contatto con il rivestimento primario, è posizionata una tubazione di drenaggio in pvc microforato del diametro di 150 mm annegata all'interno di uno strato di ghiaia che convoglia l'acqua all'interno di un pozzetto ricavato nel getto della trave (in posizione mediana rispetto allo sviluppo longitudinale della caverna). La tenuta dell'impermeabilizzazione in corrispondenza del giunto trave-volta è assicurata da una termosaldatura tra il pvc ed un giunto waterstop annegato longitudinalmente nel getto della trave. E' prevista inoltre la posa di un giunto waterstop trasversale lungo tutto lo sviluppo della volta in corrispondenza di ciascun concio, per assicurarne la compartimentazione ed un ulteriore waterstop in corrispondenza del piano d'imposta della trave, da collegare successivamente alla membrana drenante che verrà interposta prima dell'esecuzione del rivestimento definitivo delle pareti dei ribassi. Il pacchetto impermeabilizzante viene ancorato al rivestimento primario utilizzando dei dischi in pvc chiodati allo strato di spritz beton (in numero sufficiente da sostenere lo strato di tnt e pvc), ai quali viene poi termosaldato il manto in PVC. I singoli teli vengono poi collegati trasversalmente mediante termosaldatura automatica a doppia pista.

Durante la posa dell'impermeabilizzazione vengono fissati al rivestimento primario degli ancoraggi muniti di golfare per il sostegno dell'armatura della volta, da posare in opera. Il progetto prevede un'armatura costituita da una doppia maglia  $\Phi$  16 passo 20 cm integrata in chiave con armatura  $\Phi$  20

passo 20 cm. La maglia di estradosso viene fissata agli ancoraggi muniti di golfare mentre la maglia di intradosso viene sospesa a quella di estradosso mediante la posa di "spilli" con doppio uncino.

Per la posa del pacchetto impermeabilizzante e dell'armatura è stato montato un ponteggio mobile della lunghezza di 9 m che scorre su binari. Per l'esecuzione dei getti (tuttora in corso) è stata invece assemblata un'unica cassaforma da galleria con struttura portante in acciaio reticolare e manto in legno della lunghezza di 12 m, dedicata inizialmente all'esecuzione dei getti in caverna sinistra e che verrà successivamente smontata e rimontata in caverna destra.

Per l'esecuzione del rivestimento definitivo di calotta di ciascuna delle due caverne è previsto un periodo di 105 giorni solari comprensivo dei fermi per montaggio/smontaggio del ponteggio e della cassaforma, periodo durante il quale tutte le altre attività in caverna saranno interrotte.



**Figura 11. (sx) Cassaforma per il getto della volta delle caverne**

**Figura 12. (dx) Rivestimento definitivo calotta caverna sinistra**

### 3.5 Scavo del tunnel pedonale

Il tunnel pedonale (TPED) collega il TA al livello "0" con il TP ed il PV al livello "-3". Inoltre un tunnel di passaggio trasversale (TT) darà la possibilità di accedere al livello "0" delle caverne destra e sinistra. Il TP è lungo circa 100 metri e ha una sezione di scavo di 25 m<sup>2</sup> mentre il TT è lungo circa 42 metri e ha una sezione di scavo di circa 13 m<sup>2</sup>. Se nella configurazione definitiva il TP avrà una triplice funzione (ingresso/uscita dei pedoni dall'area di parcheggio, luogo sicuro in caso d'incendio e collegamento tra il centro di Trieste e il colle di San Giusto tramite il PV), durante i lavori di scavo e rivestimento definitivo costituirà unica via di accesso al fondo scavo (caverne e transetti) a partire dal momento in cui verranno iniziati i ribassi del transetto anteriore e verranno quindi eliminate le rampe all'interno del transetto stesso che permettono la discesa dei mezzi a partire dalla quota di sbarco del tunnel d'ingresso. Nonostante quindi la sua funzione sia relegata alla fase terminale degli scavi in sotterraneo, si è ritenuto opportuno anticipare i lavori di scavo sovrapponendoli a quelli dell'esecuzione dei rivestimenti di calotta delle caverne per due motivi: durante i mesi in cui vengono eseguiti i rivestimenti il transito di mezzi d'opera all'interno delle gallerie ed in generale in tutta l'area di cantiere è molto limitato (e concentrato nelle sole giornate in cui vengono eseguiti i getti), di conseguenza lo smarino del materiale di scavo del TP è reso molto più agevole, inoltre le caratteristiche del tracciato del tunnel stesso (sub-parallelo a quello delle caverne e intersecante tutti i livelli dallo 0 al -3) lo rendono assimilabile ad un cunicolo pilota la cui realizzazione in anticipo rispetto ai ribassi permetterà di fornire importanti informazioni di carattere geotecnico, che possano confermare le ipotesi progettuali e/o eventualmente suggerire l'introduzione di soluzioni di tipo diverso.

L'avanzamento del TP avviene a sezione corrente con sfondi variabili tra 1,00 m e 1,70 m, con consolidamento della roccia eseguito mediante chiodatura radiale (n. ro 8/9 chiodi in barra piena fi 25 della lunghezza di 3.5 m) legata ad un rivestimento in spritz beton dello spessore di 30 cm armato con rete elettrosaldata.

Nonostante il progetto non preveda la posa di alcuna centina con valenza strutturale per la classe di consolidamento in uso, l'esecutore ha ritenuto opportuno procedere con gli scavi posando ogni 2 sfondi una centina costituita da un profilo del tipo IPE160 con funzioni di dima al fine di limitare i fuori sagoma, contenendo di conseguenza i consumi di spritz beton. Un altro vantaggio è costituito dal fatto che l'utilizzo della dima permette di ottenere una sagoma e finitura più regolare del profilo di intradosso del rivestimento primario; è infatti allo studio da parte del Concessionario una variante che prevede di eseguire il rivestimento definitivo del tunnel pedonale (come pure quello delle volte dei transetti) in spritz beton al posto di quello inizialmente previsto in calcestruzzo armato.

Per l'esecuzione dei lavori di scavo del TP, tuttora in corso, è prevista una durata di 120 giorni solari da eseguire con unico turno 5 giorni su 7 la settimana.

Per quanto riguarda la dotazione di macchine ed attrezzature necessarie, attualmente risulta impiegato un escavatore cingolato giro sagoma con martello demolitore del peso di 135 q.li (per lo scavo), una pala cingolata del peso di 160 q.li ed un minidumper (per lo smarino), un jumbo bullonature monobraccio (perforazione dei chiodi), un impianto di miscelazione (iniezione dei chiodi), una pompa con braccio robotizzato per l'esecuzione dello spritz beton ed un sollevatore telescopico per le lavorazioni in quota (posa della rete elettrosaldata, dei chiodi e della centina).



Figura 13. (sx) Vista d'insieme del Tunnel Pedonale durante la posa della rete elettrosaldata



Figura 14. (dx) Vista d'insieme del Tunnel Pedonale durante lo scavo

Le maggiori difficoltà esecutive riscontrate sono dovute alla ristrettezza degli spazi (soprattutto la larghezza tra i due piedritti del cunicolo) che limitano fortemente il rendimento delle singole lavorazioni obbligando ad eseguire le stesse in successione senza possibilità di alcuna sovrapposizione; in particolare lo smarino può essere eseguito solo sospendendo lo scavo e comporta la necessità di lunghe manovre in retromarcia della pala caricatrice cingolata sino all'imbocco ove viene caricato il minidumper. Per gli stessi motivi particolare attenzione va posta all'organizzazione e verifica delle procedure che tutelano la sicurezza dei lavoratori: durante la fase di scavo e smarino è completamente interdetto l'accesso al tunnel a mezzi e maestranze per evitare il rischio di schiacciamento come pure durante la fase di esecuzione dello spritz beton a causa dei fumi e delle polveri prodotti dalla lavorazione che salgono dal fronte di lavoro all'imbocco.

### 3.6 Scavo di ribasso delle caverne e dei transetti

Dopo il completamento dei lavori di rivestimento delle calotte, potranno iniziare gli scavi di ribasso di caverne e transetti sino al raggiungimento della volumetria prevista dal progetto per il parcheggio delle autovetture. A partire dalla quota +9.40 (piano scavi calotte) è prevista l'esecuzione di complessivi 6 ribassi (i primi 5 di altezza 2 m e l'ultimo per l'altezza residua di 2,70 m) sino al raggiungimento della quota di fondo scavo posta a -3.30 m s.l.m. Gli abbassamenti inizieranno in CS (sarà la prima ad essere rivestita) e man mano verranno estesi anche al TA ed alla CD. Tra il primo ed il secondo livello di ribasso dovranno essere scavate pure le connessioni del parcheggio al sistema di ventilazione esterna (costituito da gallerie e cunicoli tecnici comunicanti con l'esterno). Terminato lo scavo di ribasso del livello 3 in CS prima di procedere con l'abbassamento successivo dovrà essere

scavato l'avanzamento del TP (che collega le due caverne, il pozzo di ventilazione ed il TPED ad una quota inferiore rispetto a quella del TA di 5,50 m). Man mano che verrà svuotato il volume delle caverne, e quindi abbassata la quota di fondo scavo, dovranno essere risagomate le rampe di collegamento tra il TA e le caverne stesse. Al raggiungimento della quota di fondo scavo nel TP potranno essere abbattuti i due diaframmi che metteranno in comunicazione il transetto stesso con il TPED da una parte ed il PV dall'altra. In corrispondenza dell'intersezione tra TI, TA e TPED verrà realizzato un solettone in cemento armato dello spessore di 50 cm (in futuro inglobato nei solai definitivi del parcheggio) che permetterà l'accesso dal TI al TPED; a partire da questo momento potranno quindi iniziare i lavori di scavo e ribasso residui del TA (rimozione del cuneo costituito dalle "ex" rampe di accesso), in quanto l'accesso al fondo scavo delle caverne sarà garantito dal percorso TI-TA-TPED-TP.

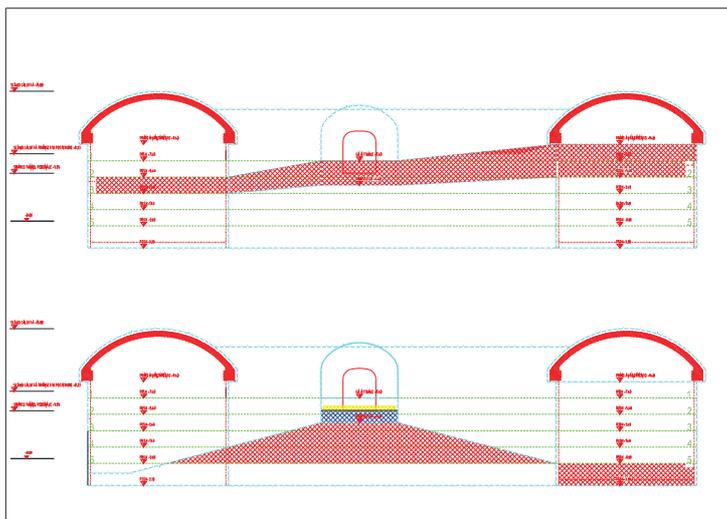


Figura 15. Fasistiche scavi di ribasso caverne e transetto anteriore

Per lo scavo ed esecuzione del rivestimento primario del singolo livello di ribasso è prevista l'adozione di una fasistica studiata con il duplice scopo di limitare l'intervallo temporale intercorrente tra l'esecuzione dello scavo e quella del rivestimento primario e di distribuire il più possibile nel tempo i volumi di smarino evitando così il sovraccarico del deposito temporaneo esterno. Inizialmente verrà scavato in ciascuna caverna e su ciascun livello (partendo dal fronte e retrocedendo sin verso al tunnel d'ingresso) un volume di strozzo centrale pari a circa il 77% del volume totale lasciando in sito i due piedritti laterali. Non appena ricavato al fronte lo spazio sufficiente per l'esecuzione delle lavorazioni successive, si procederà allo scavo dei piedritti laterali seguendo uno schema "a quinconce": prima dello scavo dei piedritti adiacenti verrà completato il rivestimento primario di quelli precedenti che sarà costituito da chiodature passive (realizzate con barre in acciaio piene  $\Phi 32$  in barra unica della lunghezza di 12 m maglia 1,00m x 1,00m) collegate tra loro con un pacchetto in spritz-beton dello spessore di 30 cm eseguito in tre fasi successive e armato con doppia maglia di rete elettrosaldata. La sezione di consolidamento sopra descritta è quella tipica prevista in assenza di particolari fenomeni deformativi; in ogni caso il progetto prevede che in funzione delle condizioni locali incontrate nel corso dello scavo si intervenga incrementando la maglia delle chiodature passive e/o realizzando delle travi in spritz-beton armato con gabbie in acciaio fissate alla parete dello scavo mediante ancoraggi attivi costituiti da tiranti a 6 trefoli della lunghezza di 18 metri.

Si prevede di completare un singolo livello di ribasso in 18-19 giorni lavorativi (1 sola caverna) lavorando su tre turni 24 h su 24 e 7 giorni su 7. Come accaduto per tutti i lavori realizzati in precedenza, anche per i ribassi nelle ore notturne potranno essere eseguite solamente la lavorazioni a basso impatto acustico (posa e iniezione dei chiodi, posa della rete elettrosaldata ed esecuzione dello spritz beton). A partire dal termine dell'esecuzione dei rivestimenti delle calotte in caverna sinistra verranno scavati e rivestiti i 62.000 m<sup>3</sup> residui in circa sette mesi con una produzione media giornaliera di circa 300 m<sup>3</sup> in banco.

### 3.7 Esecuzione dei rivestimenti definitivi

Dopo il completamento degli scavi verranno eseguiti i rivestimenti definitivi in cemento armato posato in opera, delle caverne, dei transetti, del TPED e del TI. Il rivestimento definitivo del PV è già stato eseguito durante lo scavo.

I rivestimenti delle caverne e dei transetti verranno realizzati, a partire dalla quota di fondo scavo, a salire sino alla quota delle calotte già eseguite in precedenza. Per ciascun livello verranno realizzate le pareti perimetrali controterra (dello spessore di 25 cm), i setti dei vani scala, dei locali tecnici e delle rampe, e i solai di piano (in parte a sezione piena in c.a. dello spessore di 25 cm ed in parte a sezione alleggerita dello spessore di 60 cm con elementi tipo "igloo").

Una caratteristica unica del Park San Giusto (almeno nei confronti delle strutture già esistenti nella città di Trieste) è l'adozione di solai a tutta luce con armatura lenta. Questa soluzione, oltre a rispondere positivamente con la struttura del consolidamento primario del tunneling, consente di avere i piani di parcheggio liberi da pilastri. Oltre ad una circolazione su corsie libere e più ampie ed a stalli di sosta a larghezza costante, ciò permetterà una modularità ed un aggiustamento delle singole aree di sosta praticamente senza limiti, adattandosi a quella che sarà la domanda del mercato.

Per tutte le strutture, orizzontali e verticali è previsto l'utilizzo di cassature miste acciaio-legno; le rampe elicoidali di collegamento tra i solai verranno invece realizzate utilizzando delle lastre predalles come cassero a perdere. Per la cassatura delle volte dei transetti, del tunnel pedonale e del tunnel d'ingresso sarà valutata la convenienza all'utilizzo di casseforme di tipo "industriale" traslabili oppure, vista la notevole variabilità di sezione tra un tipo di rivestimento e l'altro, potrà essere utilizzato il sistema della "centina-getto".

Si prevede di eseguire tutti i getti dei rivestimenti per mezzo di tubazioni con scarico delle autobetoniere all'esterno nelle due aree di cantiere. In questo modo si potrà ridurre drasticamente il numero di mezzi d'opera presenti all'interno delle gallerie (riducendo di conseguenza i tempi morti per manovre e avvicendamenti) e ridurre i sovraccarichi (costituiti dalle autobetoniere stesse) sui solai già realizzati, permettendo così una rimozione accelerata dei sostegni provvisori.

Il cronoprogramma di progetto prevede il completamento di tutti i rivestimenti in un periodo di circa 14 mesi.

## 4 Conclusioni

La possibilità di realizzare nei centri urbani grandi volumi sotterranei da adibire a parcheggio rappresenta una soluzione estremamente funzionale ai cronici problemi di traffico e di sosta che affliggono le grandi città, con conseguente opportunità di veicolare il traffico lungo direttrici predefinite e liberare sempre maggiori spazi alla pedonalizzazione. In quest'ottica Park San Giusto rappresenta una sorta di progetto "pilota" in Italia; per questo motivo dopo aver richiesto procedure di progettazione ed approvazione del tutto singolari durate ben 15 anni, attualmente rappresenta una sfida dal punto di vista prettamente tecnico ed esecutivo che coinvolge quotidianamente l'intero staff impegnato nel progetto.

## 5 Bibliografia

Sergas, 2011 – Park San Giusto. Un parcheggio in caverna in un centro storico con vincolo archeologico – aspetti finanziari, concessori, espropriativi e tecnici costruttivi, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee n. 100, Dicembre 2011, 59-74, Patron Editore

Grimaldi, 2013 – Relazione Finale Progetto Formativo: Realizzazione di un parcheggio multipiano interrato nel Colle di San Giusto, Trieste