

RIVESTIMENTI PREFABBRICATI DI GALLERIE METROPOLITANE REALIZZATE CON SCUDO MECCANIZZATO

Autori: G.Cassani^(a), P.Lunardi^(b), E.M.Pizzarotti^(c), M.Rivoltini^(d)

^aEngineer, Rocksoil S.p.A. Via Solferino 40, Milano, Italia

^bProfessor of Engineering Parma University, Technical Director Rocksoil S.p.A. Piazza San Marco 1, Milano, Italia

^cEngineer, Technical Manager, Rocksoil S.p.A. Via Solferino 40, Milano, Italia

^dEngineer, Rocksoil S.p.A. Via Solferino 40, Milano, Italia

Abstract: Vengono riportate le esperienze progettuali effettuate su tre lavori attualmente in corso di realizzazione circa la geometria dei conci prefabbricati, le tipologie delle unioni, il dimensionamento statico delle strutture, le modalità con cui viene seguito il tracciato. I casi presentati riguardano:

- la Metropolitana di Genova nel tratto Principe-Le Grazie (≈ 1200 m per 2 canne) con galleria da 6.1 m di diametro esterno realizzata con scudo EPB in terreni vari (materiali sciolti, marne argillose, calcari marnosi) sotto falda. Le iniezioni a tergo dei conci sono effettuate da valvole installate sui conci stessi con pressioni elevate;
- la Metropolitana di Napoli nella linea 1, lotto 3 (≈ 2100 m per 2 canne) con galleria da 6.4 m di diametro esterno realizzata con scudo meccanizzato a fronte aperto in terreni costituiti da tufi e pozzolane sciolte sopra falda con iniezioni di semplice intasamento a tergo dei conci;
- il Collegamento Ferroviario Passante di Milano nei lotti 6P, 5P e 3P (≈ 3000 m per 2 canne) con galleria da 7.5 m di diametro esterno realizzata con scudo EPB con calcestruzzo estruso a tergo dei conci, in terreni alluvionali (sabbie e ghiaie) sopra falda.

Dei tre lavori vengono evidenziati aspetti peculiari di progetto quali la geometria dei conci prefabbricati, le tipologie delle unioni, il dimensionamento statico delle strutture, le modalità con cui viene seguito l'andamento del tracciato teorico durante gli scavi) al fine di evidenziare le differenti problematiche che è stato necessario affrontare e le diverse scelte progettuali che ne sono derivate.

La progettazione dei rivestimenti in conci prefabbricati per gallerie realizzate con scudo meccanizzato full face è condizionata da numerosi fattori:

- caratteristiche dei terreni attraversati;
- coperture e morfologia di superficie;
- presenza di manufatti in prossimità delle gallerie;
- presenza d'acqua nel terreno;
- andamento plano-altimetrico del tracciato;
- tipo di iniezioni da eseguire a tergo del rivestimento;
- caratteristiche dell'attrezzatura di scavo;
- caratteristiche dei sistemi di guida e di controllo dell'avanzamento dello scudo.

Di norma, dal punto di vista statico, un rivestimento circolare in conci prefabbricati è un sistema intrinsecamente labile che può essere staticamente risolto solo se viene soddisfatta almeno una delle seguenti condizioni:

- i carichi applicati non approfittano della labilità strutturale;
- le unioni e la disposizione dei conci concorrono nel ridurre i gradi di libertà della struttura;
- le iniezioni a tergo dei conci riescono a conferire al sistema un adeguato grado di rigidità e monoliticità;
- le iniezioni a tergo dei conci vengono eseguite a pressioni tali da riequilibrare i carichi esterni.

E' evidente quindi che il progetto dei conci (spessori, armature, unioni, geometria, etc.) risulta notevolmente influenzato dalla distribuzione dei carichi al contorno dell'anello (che dipendono a loro volta dalle caratteristiche dei terreni attraversati e dal loro comportamento allo scavo) e dalle modalità di riempimento dell'intercapedine anulare tra conci e perimetro di scavo.

La presenza d'acqua lungo il tracciato comporta problemi sia tecnologici che statici:

- vanno impedito le venute d'acqua in galleria sia nel breve che nel lungo termine (scelta di guarnizioni o sistemi di iniezione che garantiscano la tenuta stagna dei rivestimenti);
- devono essere considerate spinte idrostatiche aggiuntive sui rivestimenti.

La geometria dei conci è direttamente influenzata dall'andamento plano-altimetrico del tracciato; la tipologia degli anelli messi in opera può infatti variare da un numero minimo ideale di tipi di anelli (anello retto per tracciati esclusivamente rettilinei) ad anelli di varia natura (rettilinei e trapezi) a seconda della geometria delle curve.

Tracciati molto sinuosi sia altimetricamente che planimetricamente comportano molto spesso l'impossibilità di determinare una geometria ideale e richiedono l'utilizzo di spessoramenti che accoppiati ai conci producano deviazioni più marcate dell'asse galleria o di conci speciali.

Le iniezioni realizzate a tergo di conci possono essere di due tipi:

- di semplice intasamento;
- a pressione controllata.

Mentre le iniezioni di intasamento hanno il solo scopo di garantire un contatto continuo e omogeneo tra rivestimento e terreno, le iniezioni a pressione controllata sono necessarie per evitare eccessivi cedimenti superficiali in terreni sciolti. Hanno inoltre una precisa funzione statica in quanto permettono di ricentrare i carichi agenti sul rivestimento influenzando anche la tipologia delle unioni tra conci.

Queste ultime possono essere realizzate con giunti piani o sagomati e possono richiedere o meno la presenza di bullonatura. Se infatti la bullonatura è sempre necessaria in fase di montaggio, la distribuzione delle pressioni esterne sul rivestimento può essere tale da non sfruttare la labilità dell'"anello di conci", non richiedendo la presenza di bullonatura in fase finale.

Dalle caratteristiche dell'attrezzatura di scavo dipendono la geometria dei conci in senso longitudinale (lunghezza e raggio di curvatura minimo descrivibile), particolari tecnologici quali l'armatura di diffusione dei carichi di spinta dei martinetti e la possibilità di eseguire le iniezioni di intasamento dalla coda dello scudo piuttosto che direttamente dai conci.

Al sistema di guida e di controllo di avanzamento della macchina sono legate le scelte sulla morfologia dei conci: diversi sistemi di guida possono infatti in modo differente ottimizzare la sequenza di messa in opera degli anelli.

Il sistema "rivestimento", costituito da conci, unioni e guarnizioni, non è dunque univocamente determinato e non può quindi essere indicato a priori

un rivestimento ottimale per gallerie scudate.

Vengono qui presentati tre lavori attualmente in corso di realizzazione in ambiente urbano relativi a gallerie eseguite con scudi meccanizzati e rivestite con conci in calcestruzzo prefabbricato.

I casi esposti riguardano:

- la Metropolitana Leggera di Genova nella tratta Principe - Le Grazie: $\approx$ 1200 m di galleria per due canne;
- la Metropolitana di Napoli nella Linea 1, lotto 3 dalla Stazione Salvatore Rosa alla Stazione Vanvitelli: $\approx$ 2100 m di galleria per due canne;
- il Collegamento Ferroviario Passante di Milano nei lotti 3P, 5P e 6P: $\approx$ 3800 m di galleria per due canne.

A) Metro-Genova: tratta Principe - Caricamento.

Commitente : Comune di Genova

Concessionaria and Construction Manager: Ansaldo Trasporti S.p.A.

General Constructor: Consorzio Imprese Riunite Genova 2 S.c.a.r.l.

Le gallerie di linea a singolo binario sono realizzate mediante uno scudo EPB con utilizzo di fango bentonitico come agente fluidificante ed hanno diametro esterno di 6.1 m e diametro interno utile di 4.9 m.

La scelta del metodo e dell'attrezzatura di scavo è stata guidata dalla eterogeneità dei terreni e della presenza della falda a quota uguale o superiore a quella della calotta della galleria.

In particolare lungo il tracciato si incontrano alluvioni, riporti e sedimenti marini, marne argillose e calcari marnosi, questi ultimi non sempre provvisti di buone caratteristiche meccaniche.

La copertura della galleria è sempre compresa tra i 6 e i 10 m.

Il rivestimento della galleria è costituito da un anello esterno in conci in c.a. provvisti di guarnizioni di tenuta in gomma idrofila espansiva (Hydro-tite), solidarizzati mediante bulloni sia radiali che longitudinali.

Inoltre è previsto il getto in opera in tempi differiti di un secondo anello interno completamente impermeabilizzato con guaina in pvc, armato con fibre in acciaio.

Il diametro dello scudo, prodotto dalla James Howden & Co., è di circa 6.25 m.

Il diametro esterno degli anelli in conci prefabbricati è di 6.10 m ed il loro spessore è di 0.30 m. Lo spessore minimo del rivestimento interno è di 0.20 m.

I conci prefabbricati vengono composti in modo da formare anelli di 6 conci più 1 concio di chiave.

Gli anelli sono di due tipi diversi: anelli retti aventi lunghezza costante di 1.2 m ed anelli trapezi aventi lunghezza media di 1.2 m, che accostati descrivono delle curve aventi raggio planimetrico pari a 130 m.

Una opportuna sequenza di questi due tipi di anelli, messi in opera senza rotazioni rispetto all'asse, con l'ausilio di adeguati spessoramenti approssima il tracciato teorico della galleria, particolarmente sinuoso e con curve assai strette ($R_{min} = 160$ m).

La successione degli anelli è stata determinata ed ottimizzata attraverso un programma di calcolo automatico in modo che non si abbiano in alcun punto del tracciato differenze superiori ai 2.5 cm tra asse tracciato e asse galleria.

L'attrezzatura di scavo è dotata di un sistema di guida (CAP) che può consentire un controllo completamente automatico dell'avanzamento; il sistema può infatti correggere e compensare le deviazioni accumulate rispetto al-

l'asse teorico del tracciato variando l'impostazione delle manovre di spinta e la successione ottimale degli anelli per i turni successivi.

I giunti longitudinali tra i conci e trasversali tra gli anelli sono piani e i collegamenti sono realizzati attraverso bulloni rettilinei corti vincolati a piastre in acciaio ancorate nel concio stesso.

Le iniezioni sul contorno degli anelli (Clean back System, Tachibana & Co. Ltd.) vengono eseguite con continuità non appena l'anello lascia lo scudo, da apposite valvole (Charcon Tunnel) ubicate vicino ai bordi dell'anello, nei conci adiacenti a quello di chiave, con modalità e pressioni tali da garantire che l'anello sia sollecitato da spinte uniformi sul suo contorno in modo che i conci siano sottoposti a prevalenti sforzi di compressione. Le iniezioni sono realizzate con pressione costante e controllata, pari o di poco superiore al massimo valore dei carichi esterni. In tal modo si ottiene una piena centratura delle pressioni sui rivestimenti.

Le modalità di esecuzione delle iniezioni a tergo dei conci permettono di non realizzare la continuità trasversale tra i conci. Si è optato quindi per giunti lisci sia in senso longitudinale che trasversale.

Ogni anello può essere considerato staticamente indipendente dal resto della struttura.

Per garantire alla struttura maggiore sicurezza e rigidità e per evitare dislocazioni sono comunque stati utilizzati bulloni sia in direzione longitudinale che trasversale, in ogni caso necessari per la messa in opera dei conci. Allo stesso scopo i giunti trasversali sono sfalsati da anello ad anello. Ciò richiede la produzione di due tipi di anelli differenti: tipo A con concio di chiave a destra e tipo B con concio di chiave a sinistra.

B) Metropolitana di Napoli: Linea 1, lotto 3

Committente : Comune di Napoli

Concessionaria : Società per la progettazione e la costruzione della
Metropolitana di Napoli S.p.A.

Construction Manager: Metropolitana Milanese Strutture e Infrastrutture
per il territorio S.p.A.

General Constructor: Metrosud S.p.A. Napoli

Le gallerie di linea a singolo binario ($\phi_{ext} = 6.40$ m) sono realizzate mediante l'impiego di uno scudo a fronte aperto con mantello articolato (Markham & Co. Ltd.).

I terreni attraversati dalle gallerie sono costituiti da rocce e suoli di natura vulcanica: tufi e pozzolane in parte sciolte ed in parte coerenti sempre sopra falda.

Le tratte in cui la galleria attraversa il tufo e la pozzolana sono state ben identificate dalla campagna geognostica e per i due diversi materiali è stato sviluppato un diverso rivestimento.

Mentre infatti i tufi in esame manifestano un ottimo comportamento allo scavo e non danno luogo a spinte sul rivestimento, la pozzolana ha il comportamento classico di una terra.

La copertura totale della galleria è compresa tra i 10 e i 30 m.

Il rivestimento definitivo della galleria è costituito da un anello in conci prefabbricati realizzati in c.a. per il tratto in pozzolana ed in c.f.r. (Bekaert) per il tratto in tufo, provvisti di guarnizioni di tenuta e solidarizzati mediante bulloni sia radiali che longitudinali.

Il diametro dello scudo è di ≈ 6.55 m, il diametro esterno dei conci prefabbricati è di 6.40 m ed il loro spessore è di 0.30 m.

I criteri geometrici utilizzati per il progetto dei conci sono gli stessi

adottati per la Metropolitana di Genova; gli anelli sono infatti di due tipi: retti aventi lunghezza costante e trapezi aventi lunghezza media pari a 1.2 m, che accostati descrivono una curva planimetrica con 210 m di raggio, con giunti longitudinali sfalsati (concio di chiave alternativamente a destra e a sinistra).

Come detto il tracciato teorico della galleria viene approssimato con una sequenza di questi due tipi di anelli senza rotazioni rispetto all'asse e con l'ausilio di adeguati spessoramenti. La successione degli anelli è stata determinata ed ottimizzata con un programma di calcolo automatico in modo da non avere alcun punto del tracciato differenze superiori ai 2.5 cm tra asse tracciato e asse galleria. Il controllo dell'avanzamento è ottenuto mediante un sistema di rilevamento (ZED) che consente di stabilire la posizione della macchina rispetto all'asse tracciato. Questi dati permettono all'operatore di intervenire sul sistema di manovra dello scudo per cercare di minimizzare gli errori di guida.

I giunti longitudinali e trasversali tra i conci sono piani e i collegamenti sono realizzati attraverso bulloni rettilinei e curvi.

Le iniezioni sul contorno degli anelli vengono eseguite da valvole installate direttamente nei conci (Charcon Tunnel) a semplice intasamento dell'extrascavo con pressioni tali da permettere il completo riempimento dell'intercapedine anulare e da evitare ritorni della malta all'interno dello scudo attraverso la guarnizione di coda.

Il collegamento radiale mediante bulloni assicura la trasmissione di azioni assiali e taglianti, ma non è in grado di trasmettere momento se non in modo trascurabile. Considerando quindi la successione di anelli come monolitica è necessario incrementare i momenti calcolati in base a tale ipotesi. I momenti di progetto sono praticamente pari al doppio dei momenti di calcolo.

Per la tratta in tufo la bullonatura longitudinale e radiale è stata dimensionata per le azioni di montaggio e di falsa manovra della messa in opera degli anelli. Il tipo di bullonatura è la stessa già descritta per Metro Genova.

Nel caso invece di conci in pozzolana la bullonatura è stata dimensionata in modo da permettere la trasmissione delle azioni di taglio fra i conci; i bulloni trasversali sono dello stesso tipo di quelli previsti in tufo, ma in numero doppio, i bulloni longitudinali sono curvilinei e ad alto limite di snervamento.

E' interessante sottolineare che lo scudo adottato, mancando di doppie spazzole di tenuta, non consente l'esecuzione di iniezioni in pressione; d'altra parte tali iniezioni non risultano strettamente necessarie neanche nella parte in pozzolana date le coperture relativamente alte, che rendono meno importanti i problemi di cedimenti superficiali, che hanno invece dettato la scelta di iniezioni a pressione controllata a Genova e Milano.

Per analoghe motivazioni è giustificabile la scelta del tipo di attrezzatura di scavo, a fronte aperto anziché in pressione come negli altri due casi presentati.

C) Collegamento Ferroviario Passante di Milano: lotti 3P, 5P e 6P

Committente: Regione Lombardia, Comune di Milano, Ferrovie dello Stato, Ferrovie Nord Milano

Construction Manager: MM Strutture ed Infrastrutture del Territorio S.p.A.

General Constructor: Consorzio Passante S.c.a.r.l.

Progettazione esecutiva : C.P.E. s.r.l., Reico S.p.A. e Rocksoil S.p.A.

Le gallerie di linea a singolo binario sono realizzate mediante uno scudo

EPB in terreni completamente incoerenti e parzialmente sotto falda.

Il sottosuolo milanese è infatti interamente costituito da depositi alluvionali la cui granulometria varia da sabbia limosa a ghiaia. La densità del terreno varia con la profondità: da piuttosto densa per i primi 10 m a molto densa a profondità superiori ai 30 m.

La copertura delle gallerie è compresa tra i 4 ed i 14 m.

Il rivestimento è costituito da conci in c.a. prefabbricati provvisti di guarnizioni di tenuta, solidarizzati mediante bulloni radiali e spinotti in plastica longitudinali (Mayreder Consult).

Non è previsto alcun getto di finitura all'interno del rivestimento in conci, che costituisce, come nel caso di Napoli, il rivestimento definitivo delle gallerie.

Il diametro dello scudo EPB, prodotto dalla Neyrpic Framatome Mecanique su progetto e con la collaborazione delle Mitsubishi Heavy Industries, è di circa 8.00 m. L'agente fluidificante utilizzato al fronte all'interno della camera di scavo è una schiuma (procedimento Obayashi).

Il diametro esterno dell'anello in conci prefabbricati è di 7.5 m ed ha uno spessore di 0.30 m; l'anello è costituito da 6 conci più 1 concio di chiave aventi lunghezza media di 1.2 m.

Gli anelli hanno tutti forma trapezia in modo da formare se semplicemente accostati una curva planimetrica del raggio minimo di 300 m.

Le iniezioni sul contorno degli anelli a riempimento dell'extrascavo vengono realizzate con calcestruzzo estruso, secondo tecnologia Hochtief, pompato attraverso ugelli posti lungo la circonferenza della coda dello scudo in modo da riempire lo spazio tra conci e scavo immediatamente alle spalle della macchina.

Il calcestruzzo è inoltre mantenuto costantemente in pressione in modo da controbilanciare le spinte del terreno impedendo l'innescarsi di cedimenti. Il controllo dell'avanzamento della fresa viene realizzato con un monitoraggio continuo della posizione della macchina rispetto all'asse teorico del tracciato; con un sistema di rilevamento laser vengono infatti valutate la posizione della macchina rispetto alla progressiva teorica di avanzamento e l'angolo di deviazione planimetrica fra asse fresa e asse tracciato (ZED).

Degli inclinometri provvedono invece a valutare il rollio della macchina intorno al suo asse (roll) ed il suo beccheggio (look-up).

Tutti questi dati permettono di intervenire e correggere la posizione della fresa in modo da minimizzare lo scostamento tra asse reale e asse teorico.

Inoltre tre estensometri (Ring Orientation Unit) posti tra i martinetti di spinta lungo lo sviluppo circolare dell'anello di conci rilevano l'interspazio tra l'ultimo anello posato e la macchina.

Viene quindi automaticamente calcolata la rotazione da dare all'anello per riempire al meglio lo spazio rimasto tra ultimo anello montato e la parte posteriore della fresa.

E' interessante notare che l'applicazione del descritto sistema che prevede la rotazione degli anelli, messi in opera comunque sempre con giunti longitudinali non continui, è possibile grazie alla particolare tecnologia di iniezioni adottata che prevede la loro realizzazione direttamente dalla coda dello scudo senza attrezzare i conci stessi, in posizioni particolari da mantenere costanti lungo tutto il tracciato, con apposite valvole. Con questo sistema si ottiene inoltre di minimizzare il numero di conci diversi (7) conseguendo ovvi vantaggi in termini produttivi.

I giunti trasversali sono piani ed i collegamenti tra due anelli successivi sono realizzati con spinotti in plastica, che vengono forzati nei conci in alloggiamenti appositamente ricavati nel calcestruzzo.

Il sistema di iniezione adottato (continuo e a pressione controllata) non richiede che queste giunzioni offrano particolari prestazioni statiche e gli spinotti sono stati di fatto dimensionati per resistere alle operazioni di montaggio e ad eventuali false manovre del sistema fresa-erettore.

I giunti radiali sono invece sagomati in modo da permettere l'inserimento di una barra di guida che facilita la posa in opera dei conci e vengono serrati per mezzo di bulloni curvi.

Anche questi bulloni non hanno particolari funzioni statiche, ma provvedono alla corretta compressione della guarnizione di tenuta idraulica e a dare continuità elettrica alle armature per provvedere alla messa a terra del rivestimento dei vari tratti di galleria.

Le sollecitazioni risultanti sull'anello di conci sono essenzialmente di compressione grazie all'effetto prodotto dalle pressioni di iniezione del calcestruzzo a tergo dei conci.

Questo ha comportato armature estremamente leggere e giunzioni con funzione non statica (non c'è passaggio di azioni flettenti fra i giunti e le azioni taglienti vengono trasmesse per attrito) come già precedentemente descritto.

Le principali caratteristiche geometriche e tecnologiche adottate nei tre lavori presentati sono riassunti nella tabella 1.

Dalle esperienze presentate risulta evidente che la progettazione del rivestimento di una galleria scudata nel suo complesso (conci, unioni e guarnizioni) va affrontata caso per caso, mettendo a punto il sistema macchina-conci-terreno, cioè definendo una vera e propria tecnologia costruttiva ed operativa che consente spesso di introdurre elementi di originalità nelle soluzioni di volta in volta adottate.

	Genova Metro	Napoli Metro	Milan Railway Link
length	≈1200 m per 2 canne	≈2100 m per 2 canne	≈3800 m per 2 canne
external ϕ	6.10 m	6.40 m	7.50 m
thickness	0.30 m	0.30 m	0.30 m
soil	embankment, alluvial ground, argillaceous marl and marly limestone.	tuffs and pozzolane	alluvial ground, gravel and sands
cover overburden	6 ÷ 10 m	10 ÷ 30 m	4 ÷ 14 m
water table	a livello calotta galleria	assente	al di sotto della galleria
internal lining	0.20 m fiber reinforced concrete	-	-
track min. radius	160 m	210 m	300 m.
shield	EPB (slurry)	road header shield	EPB (foam)
injections	continuous and at controlled pressure eseguite dai conci	di semplice intasamento eseguite dai conci	continuous and at controlled pressure (extruded concrete