

Progetto “Quadrilatero Marche-Umbria”

Applicazione di un nuovo sistema di rivestimento di prima fase costituito da centine tubolari

P. Lunardi⁽¹⁾, F. Romozzi⁽²⁾, A. Simonini⁽³⁾, D. Bonadies⁽⁴⁾, C. Avignone⁽⁵⁾, C.L. Zenti⁽⁶⁾

⁽¹⁾ Consulente, Studio di progettazione Lunardi, Milano

⁽²⁾ Direttore, Quadrilatero Marche Umbria S.p.A.

⁽³⁾ Responsabile Progetto Infrastrutturazione Viaria, Quadrilatero Marche Umbria S.p.A.

⁽⁴⁾ Amministratore Delegato RPS s.r.l.

⁽⁵⁾ Direttore Tecnico Strabag Italia S.p.A.

⁽⁶⁾ Consulente Tecnico Elas Geotecnica s.r.l e Officine Maccaferri S.p.A.

ABSTRACT: Il controllo dell'interazione terreno-struttura è uno dei processi più critici durante la realizzazione di una galleria ed i rivestimenti possono essere utilizzati sia per la stabilizzazione iniziale dello scavo che come supporto permanente oppure come una combinazione di entrambi. L'articolo richiama brevemente l'approccio progettuale e la sperimentazione condotta sia in laboratorio sia in sito, già oggetto di un precedente articolo. Descrive invece in maniera diffusa il primo cantiere in cui si è deciso di installare questa nuova soluzione di rivestimento di prima fase, richiamando dapprima l'intero progetto Quadrilatero Marche Umbria e dettagliando poi il caso della galleria a doppia canna Pale dove è stata installata la nuova soluzione. L'attenzione è focalizzata su aspetti quali: l'installazione, il monitoraggio, la sicurezza e sono illustrati i vantaggi non solo tecnici, ma anche economici dell'utilizzo della nuova soluzione.

1 Introduzione

Il controllo dell'interazione terreno-struttura è uno dei processi più critici durante la definizione del progetto di una galleria. Alcune delle decisioni, sia progettuali che costruttive, che è necessario prendere soprattutto in tema di riduzione delle deformazioni attorno al cavo, possono essere molto critiche perché tali deformazioni hanno un effetto diretto sia sulla stabilità a breve e lungo termine della galleria sia perché hanno un ruolo importante nell'identificazione del carico di progetto del sistema di rivestimento (Lunardi et al., 1994).

I rivestimenti delle gallerie (di prima fase e definitivi) sono sistemi strutturali installati durante e/o dopo lo scavo per fornire al terreno il confinamento necessario a mantenere l'apertura dello scavo, limitare i possibili afflussi d'acqua, sostenere le pertinenze. Sono utilizzati sia per la stabilizzazione temporanea dello scavo per quella permanente o una combinazione di entrambe (Hoek et al., 1981).

I rivestimenti delle gallerie sono sistemi strutturali che differiscono da altre strutture tipiche dell'ingegneria per l'elevato grado di interazione con il terreno circostante, che è un aspetto integrante del loro comportamento, della loro stabilità e della loro capacità portante nei confronti del carico complessivo. La mancanza di un adeguato confinamento per il terreno circostante allo scavo può portare al danneggiamento del rivestimento e quindi della galleria sia nel breve che nel lungo termine. Inoltre la capacità del rivestimento di deformarsi sotto determinati carichi è funzione sia della propria rigidità che di quella del terreno circostante (Beiniawski, 1984).

Negli ultimi anni si sono palesati notevoli progressi nel mondo della progettazione e della costruzione dei rivestimenti di prima fase delle gallerie. La tendenza è quella di abbandonare la carpenteria

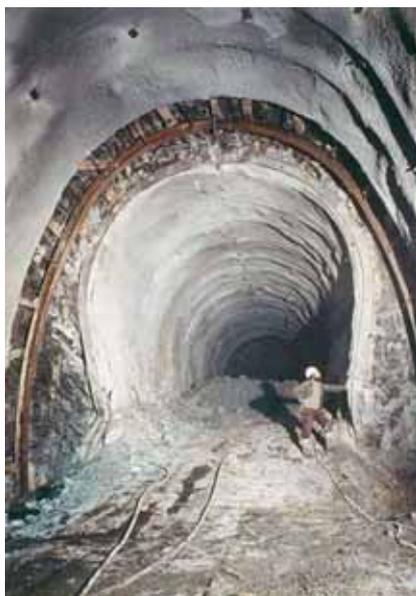
tradizionale, che prevede l'adozione di pesanti profili aperti in acciaio laminato inglobati in un manto di spritz-beton eventualmente rinforzato con rete e/o fibre d'acciaio, preferendo soluzioni più leggere, mediante l'uso di profili tubolari, anch'essi in acciaio, che una volta riempiti con spritz-beton pompato, presentano una sezione trasversale particolarmente performante. Lo sviluppo delle centine tubolari ha fornito agli ingegneri ed agli appaltatori maggiori opzioni di progettazione, aumentando la flessibilità della soluzione tradizionale e proponendo una soluzione alternativa efficace, sia dal punto di vista dei costi sia per gli aspetti legati alla sicurezza dei lavoratori.

Nel seguito gli autori descrivono le evidenze emerse durante l'applicazione di tale nuovo sistema di rivestimento di prima fase, mediante rinforzi tubolari ad arco, per la realizzazione della galleria Pale, nell'ambito del Progetto Quadrilatero Umbria-Marche che oggi è in fase molto avanzata di realizzazione. Sarà inquadrato brevemente l'intero progetto e la geologia dell'ammasso interessato dallo scavo, quindi si illustrerà la sperimentazione condotta sulla nuova tecnologia sia in laboratorio sia in sito per poi descriverne nel dettaglio l'applicazione in galleria, le modalità di messa in opera e i risultati che si sono evidenziati anche dal punto di vista della sicurezza. Si procederà poi all'analisi e alla comparazione dei risultati dei monitoraggi relativi a tale nuovo sistema di rivestimento, costituito da centine tubolari e calcestruzzo proiettato rinforzato con rete metallica e/o fibre d'acciaio, con quelli relativi alla soluzione tradizionale, con la quale si era iniziato lo scavo della galleria. È fondamentale sottolineare che l'adozione del nuovo sistema è stata inserita come variante nel progetto dopo la convalida della sua efficacia, verificata in un campo-prove appositamente allestito in sito, come dettagliato in un precedente articolo (Zenti, et al 2012)

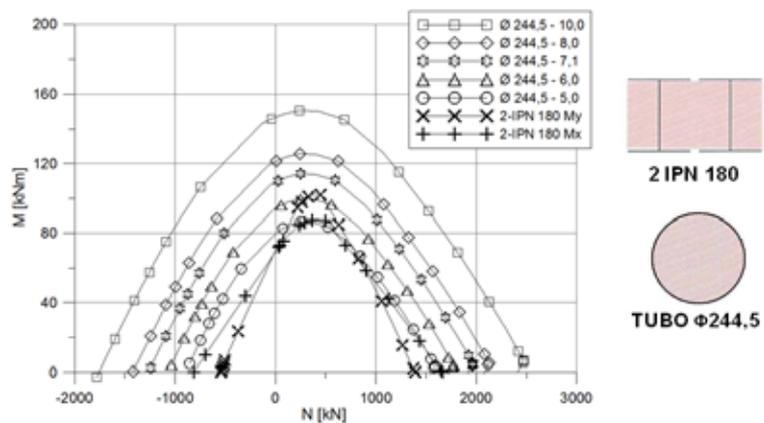
2 Attività sperimentale

Preliminarmente all'attività sperimentale sono state condotte diverse analisi numeriche al fine di identificare i profili adeguati per un confronto consistente (vedi figura 1b). Il lavoro sperimentale è stato articolato in due fasi: la prima delle quali, condotta in laboratorio, necessaria per la convalida della analisi numeriche mentre la seconda, realizzata in sito, ha avuto come obiettivo il confronto della risposta strutturale dei due tipi di centine, standard e tubolare.

Sia l'indagine numerica che quella sperimentale hanno confermato la miglior risposta strutturale della sezione tubolare cava rispetto a quella della centina tradizionale a profilo aperto. In particolare, la sperimentazione in laboratorio ha confermato il comportamento a sezione mista (acciaio-calcestruzzo) della centina tubolare, attinente a quanto modellato in fase di progettazione, comportamento che non si è invece evidenziato per la centina tradizionale realizzata con profilo aperto. Il campo prova in sito (Fig. 2) aveva l'obiettivo di verificare la compatibilità delle nuove centine tubolari con le esigenze operative in sottoterraneo, nonché quello di confermare sul campo le risultanze delle analisi di laboratorio condotte in merito all'efficienza statica del nuovo profilo, ponendole a confronto con le centine realizzate con profili "aperti", di tipo tradizionale.



a)



b)

Figura 1. a) Esempio di instabilità di un profilo aperto; b) Analisi preliminari

In riferimento a particolari condizioni locali, un profilo chiuso anulare fornisce senza dubbio una risposta più omogenea e migliore rispetto a quella che può fornire un profilo aperto tradizionale. Basti pensare alle condizioni di contatto non uniformi che si possono produrre, tra l'ala di un profilato aperto e il terreno, durante la fase di avanzamento dello scavo di una galleria, dove raramente è riscontrabile uno stato piano di deformazione (Fig. 1a).

È quindi lecito ipotizzare un peggioramento delle condizioni di lavoro del profilato a doppio "T" in presenza di carichi con componente orizzontale. Utilizzare una sezione dotata di simmetria assiale, quale quella dei profili tubolari chiusi, può contribuire significativamente a risolvere queste problematiche. Sostituendo il profilo tradizionale aperto con uno circolare cavo, si ottiene una diversa e più efficiente distribuzione del metallo e quindi una sezione resistente più equilibrata, capace di farsi carico sia delle sollecitazioni assiali sia di quelle eccentriche, indipendentemente dalla loro direzione.

Il metodo di analisi ed il dettaglio dell'attività sperimentale svolta sia in laboratorio che in sito sono state oggetto di un precedente articolo, al quale si rimanda per maggiori approfondimenti (Zenti, et al 2012).

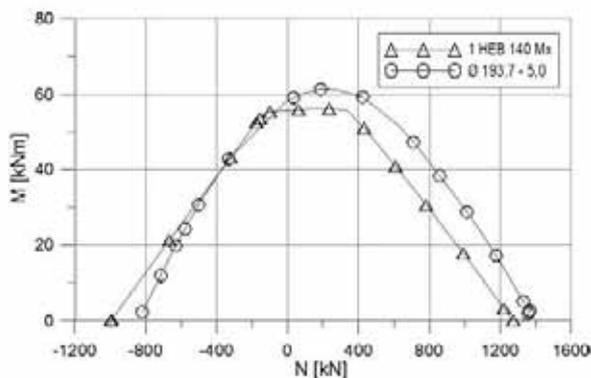


Figura 2. Campo Prove: a) Confronto Domini di Resistenza; b) Installazione della centina tubolare.

3 Il progetto

Il Progetto Quadrilatero Marche Umbria prevede la realizzazione di opere infrastrutturali viarie (i cui assi rappresentano idealmente i quattro lati di un quadrilatero) attraverso un innovativo piano di cofinanziamento, denominato Piano di Area Vasta.

Il Progetto infrastrutturale viario consiste nel completamento e adeguamento di due arterie principali (l'asse Foligno-Civitanova Marche, strada statale 77 e l'asse Perugia-Ancona, statali 76 e 318), della Pedemontana Fabriano-Muccia/Sfercia e di altri interventi viari, idonei ad assicurare il raccordo con i poli industriali esistenti e, più in generale, a migliorare ed incrementare l'accessibilità alle aree interne delle regioni interessate.

Dal punto di vista strategico-logistico il Progetto infrastrutturale viario s'inserisce nel sistema delle principali dorsali del Paese e consentirà di ridurre il deficit infrastrutturale che riguarda le regioni Marche e Umbria assicurando un efficiente collegamento con le regioni circostanti e verso l'Europa (<http://www.stradeanas.it>). La figura 3 mostra l'area di progetto mentre i diversi interventi connessi sono elencati nella Tab.1 (<http://www.quadrilaterospa.it>).

3.1 La Galleria Pale

La nuova soluzione per il rivestimento di prima fase, realizzato mediante centine tubolari B.ZERO-Tondo, è stato applicato per la prima volta nella galleria a doppia canna Pale, attualmente in costruzione (giugno 2013).

Tale galleria fa parte della tratta Foligno-Pontelatrava (Tab.1 - lotto 1.2) del Progetto Quadrilatero, che nei suoi 35 Km di lunghezza comprende altre 12 gallerie (vedasi Tab. 2), 8 tratte in cut & cover e 16 viadotti. Il 60% della tratta è perciò realizzato in sotterraneo, con impatto ambientale davvero minimo.

Sia la canna nord che la canna sud della galleria Pale, attualmente in fase di realizzazione, attraversano un ammasso roccioso di Calcere Massiccio contraddistinto da buone caratteristiche meccaniche (Fig. 4) e presentano un comportamento alle scavo a "nucleo-fronte stabile" (approccio ADECO-RS, Lunardi, 2006).

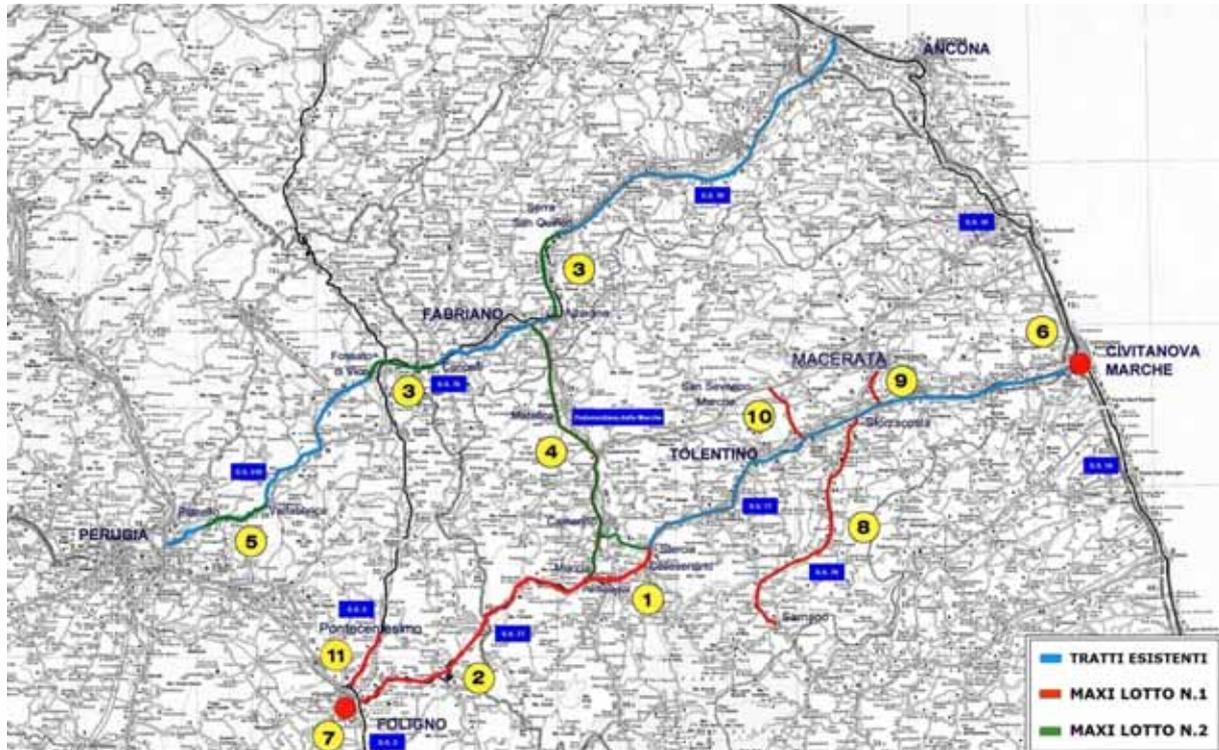


Figura 3. Area di progetto

Il progetto prevedeva conseguentemente di avanzare a piena sezione operando la sezione tipo Ac, caratterizzata da 25 cm di calcestruzzo proiettato rinforzato una centine tradizionali costituite da un profilo singolo HEB 140 in acciaio S275, intervallate a passo 1,5 m.

La centina tubolare B.ZERO-Tondo, scelta per sostituire il profilato tradizionale, è costituita da un profilo circolare cavo d'acciaio classe S275, di 193,7 mm di diametro e 5 mm di spessore. Il dominio di resistenza di tale sezione tubolare è paragonabile a quello della sezione tradizionale precedentemente adottata (Fig. 2a).

Nelle sezioni di applicazione il progettista ha definito questa nuova soluzione con centine tubolari prevedendo un passo di installazione pari a 1,8 m e adottando come sistema di connessione una soluzione costituita da catena doppia incrociata, che permette di garantire alla centina l'apporto stabilizzante di una controventatura, applicata lungo il suo intero sviluppo, che ne garantisce la stabilità fuori piano della struttura (Fig. 5). È bene precisare che tale decisione è stata presa sulla base dei buoni risultati registrati durante l'attività sperimentale in sito (Zenti, et al. 2012).

3.2 Installazione delle rivestimento di prima fase

Il rivestimento di prima fase di una galleria ha il compito di contenere temporaneamente le pareti dello scavo in attesa del getto del rivestimento definitivo, onde evitare problemi di rilascio di materiale, soprattutto dalla calotta. Esso viene realizzato immediatamente dopo lo scavo, con metodologie scelte in funzione del tipo e del comportamento allo scavo dell'ammasso attraversato. Una di queste metodologie prevede appunto la posa di centine metalliche. L'uso in tale ambito di centine metalliche tubolari al posto di quelle tradizionali a profilo aperto non comporta grossi cambiamenti nelle fasi di assemblaggio e messa in opera, che si svolgono come segue:

Tabella 1. Inquadramento del progetto

APPALTI	SUB LOTTI	INTERVENTI	STATO DI ATTUAZIONE	Fig.3
	1.1	SS77 Collesentino - Pontelatrive (2,7 km)	Aperto al traffico il 3 dicembre 2009	1
	1.2	SS77 Foligno - Pontelatrive (34,7 km sub lotto 1+2)	Aperti i cantieri novembre 2009	2
	1.3	Allaccio SS77 - SS16 Civitanova Marche (1,3 km)	Progetto Definitivo in Conferenza di Servizi	6
	1.4	Allaccio SS 77 - SS3 Foligno (8 km)	Progetto Definitivo in Conferenza di Servizi	7
Maxi Lotto 1	2.1	SS77 Foligno - Pontelatrive	Aperti i cantieri novembre 2009	2
	2.2	Intervalliva Macerata (3 km)	Progetto Definitivo approvato CdA 14/02/13	9
	2.3	Intervalliva Tolentino - San Severino (7,2 km)	Progetto Definitivo in corso di istruttoria interna	10
	2.4	SS78 Sforzacosta - Sarnano (31 km)	Progetto Definitivo in corso di istruttoria interna	8
	2.5	SS3 Pontecentesimo - Foligno (5 km)	Prossima apertura dei cantieri	11
	1.1	SS76 Serra S. Quirico - Albacina, Fossato di Vico - Cancelli (22,3 km)	Aperti i cantieri inizio 2009	3
Maxi Lotto 2	1.2	SS318 Pianello - Valfabbrica (8,1 km)	Aperti i cantieri inizio 2009	5
	2.1	Pedemontana Fabriano - Matelica nord	Progetto Definitivo approvato dal CIPE	4
	2.2	Pedemontana Matelica - Muccia/Sfercia	Progetto Definitivo conclusa procedura Conferenza dei Servizi	4

Tabella 2. Gallerie tratta Foligno-Pontelatrava

Gallerie S.S.77 Foligno - Pontelatrive	lunghezza [m]	
	nord	sud
Belfiore	1.100	1.109
Pale	2.319	2.045
Sostino	2.820	2.834
La Franca	1.052	1.075
Cupigliolo	2.182	2.100
La Palude	1.166	1.226
Varano	3.455	3.472
Serravalle	1.341	1.341
Bavareto	1.682	1.661
Muccia	2.126	2.223
Costafiore	565	552
Maddalena	670	550
Rocchetta	840	980

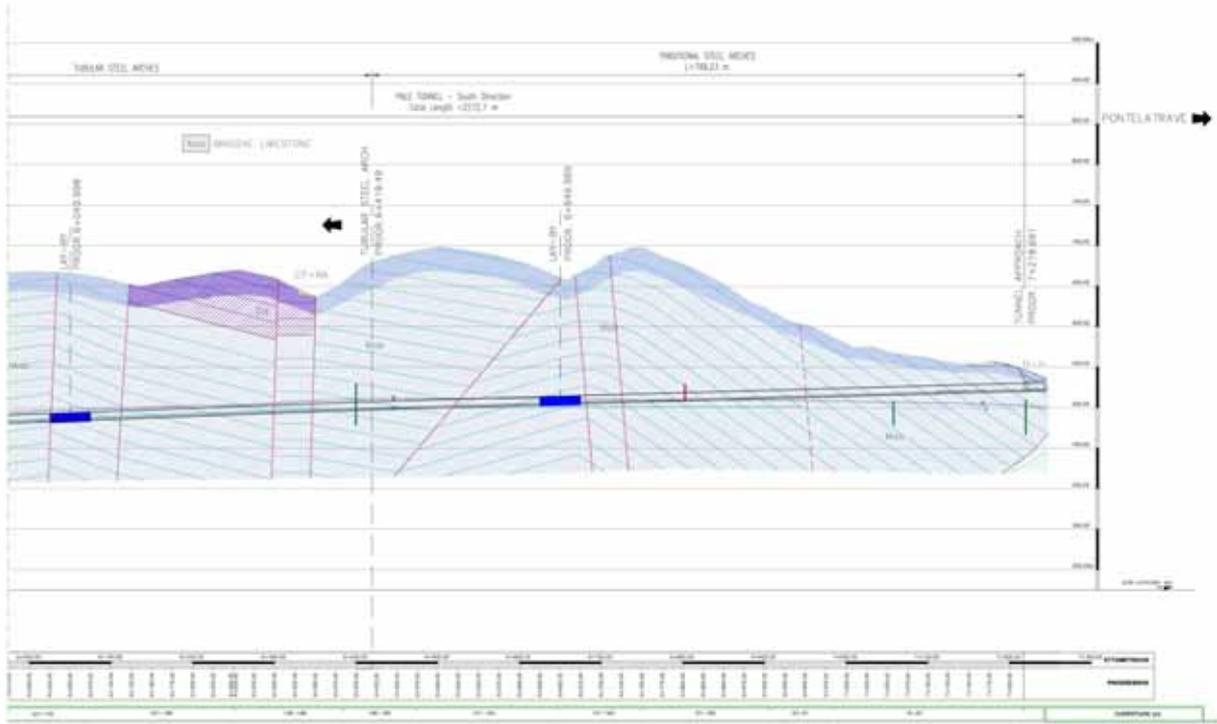


Figura 4. Profilo Geologico

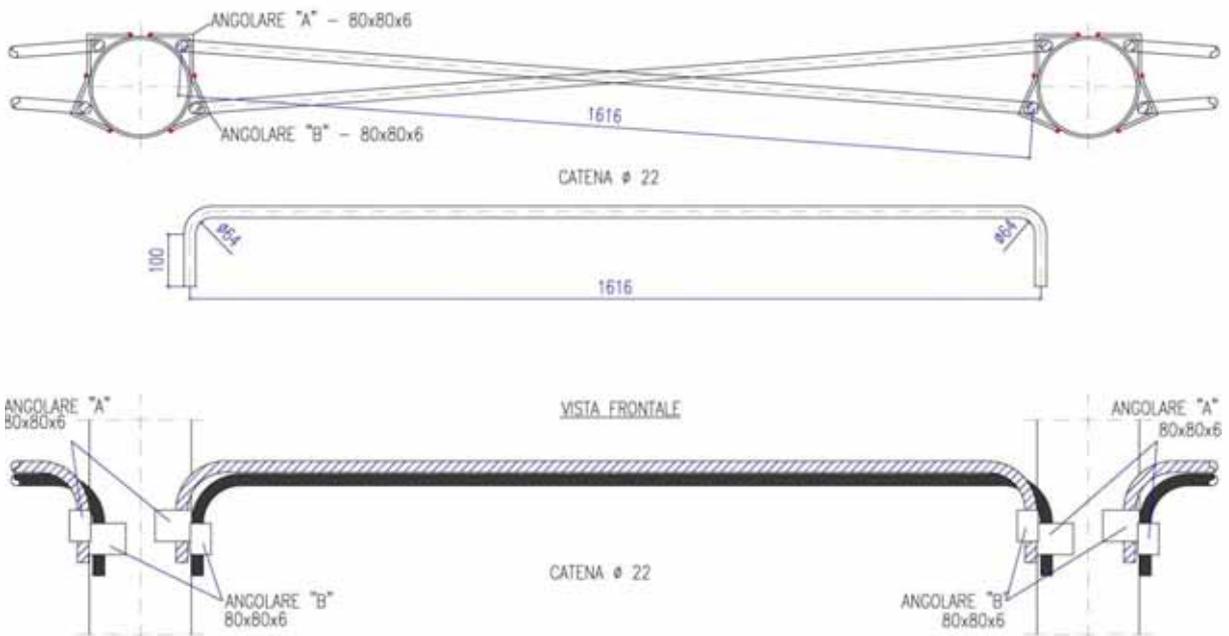


Figura 5. Catena doppia incrociata

- **Movimentazione componenti:** Tale operazione è eseguita dal manovratore del mezzo utilizzato per il trasporto e da un addetto a terra che imbraca il carico e segnala eventuali ostacoli lungo il percorso.
- **Trasporto componenti:** durante il trasporto il carico è sollevato ad una altezza necessaria a superare gli ostacoli presenti.
- **Preassemblaggio:** mediante l'uso dell'autogrù gli elementi della catena sono appoggiati su spessori a terra e attestati. Questa fase può essere eseguita in prossimità del fronte di scavo (Fig.6.a) o al di fuori del tunnel, a seconda dell'organizzazione del cantiere.

- Posa in opera: la centina, una volta al fronte, è sollevata e posta in opera. Il manovratore stabilizzata la macchina e con il braccio di sollevamento sposta la centina mediante la pinza (Fig. 6b).
- Installazione catene: ultimato il posizionamento della centina, si procede al suo collegamento con la precedente mediante catene metalliche (Fig. 6c). Successivamente, tra le centine e l'ammasso roccioso vengono inseriti fogli di rete metallica. Tale operazione viene eseguita solo in talune tipologie di terreno e comunque laddove non è prevista la successiva esecuzione di spritz beton fibrorinforzato con fibre in acciaio. Essa è eseguita da due lavoratori che, per portarsi in quota, utilizzano un ponte sviluppabile su carro. La rete viene infine fissata alle catene tramite filo d'acciaio.
- Riempimento centina tubolare: il riempimento viene realizzato semplicemente collegando la lancia della pompa da spritz al dispositivo di iniezione di cui è dotata la centina tubolare. Il completo riempimento viene realizzato in circa un minuto, dato che il volume da riempire è inferiore a 1 m^3 ed è segnalato dalla fuoriuscita del calcestruzzo dai fori di sfiato posti in corrispondenza dell'estradosso della calotta della centina. Al termine di questa fase, la lancia viene staccata dal dispositivo d'iniezione e si procede alla posa del calcestruzzo proiettato.

Dal punto di vista operativo la centina tubolare si è dimostrata molto stabile e maneggevole nelle fasi di trasporto e posa in opera. In virtù della elevata rigidità della stessa è stato possibile verificare in campo come risulti essere stato eliminato il rischio d'instabilizzazione in fase di posizionamento, tipico dei profili aperti più deformabili. Ciò garantisce agli operatori di lavorare con un più elevato livello di sicurezza.

La fase di riempimento è rapida e funzionale e garantisce il completo riempimento del profilo (Fig.6.d). Le piastre di giunzione (Fig. 7) sono caratterizzate da un foro centrale che, completata la fase di riempimento, consente la formazione di un arco continuo di calcestruzzo all'interno del profilo tubolare. Questo sistema di rinforzo assicura l'efficace collaborazione tra il profilo circolare cavo in acciaio e il riempimento in calcestruzzo, realizzando un sistema composito caratterizzato da un reale comportamento "a sezione mista" (Eurocodice 4) che consente una distribuzione omogenea degli sforzi.



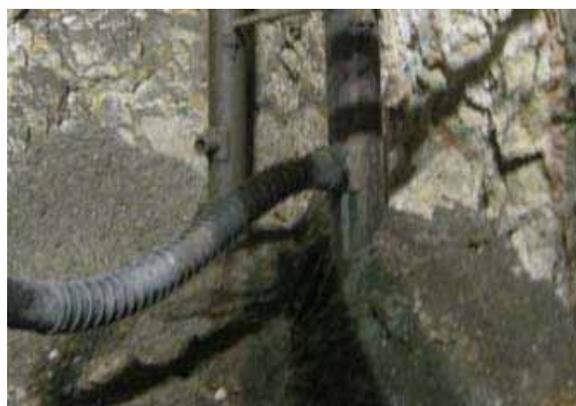
a)



b)



c)



d)

Figura 6. Fasi di installazione della centina tubolare: a) assemblaggio; b) installazione al fronte; c) catena doppia; d) riempimento

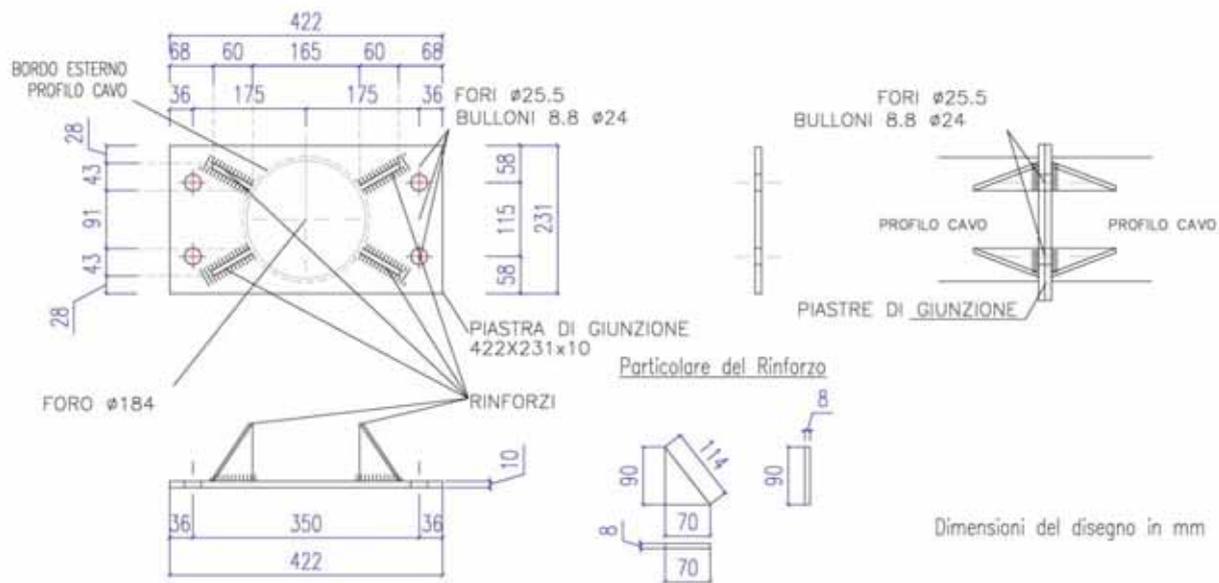


Figura 7. Piastre di giunzione

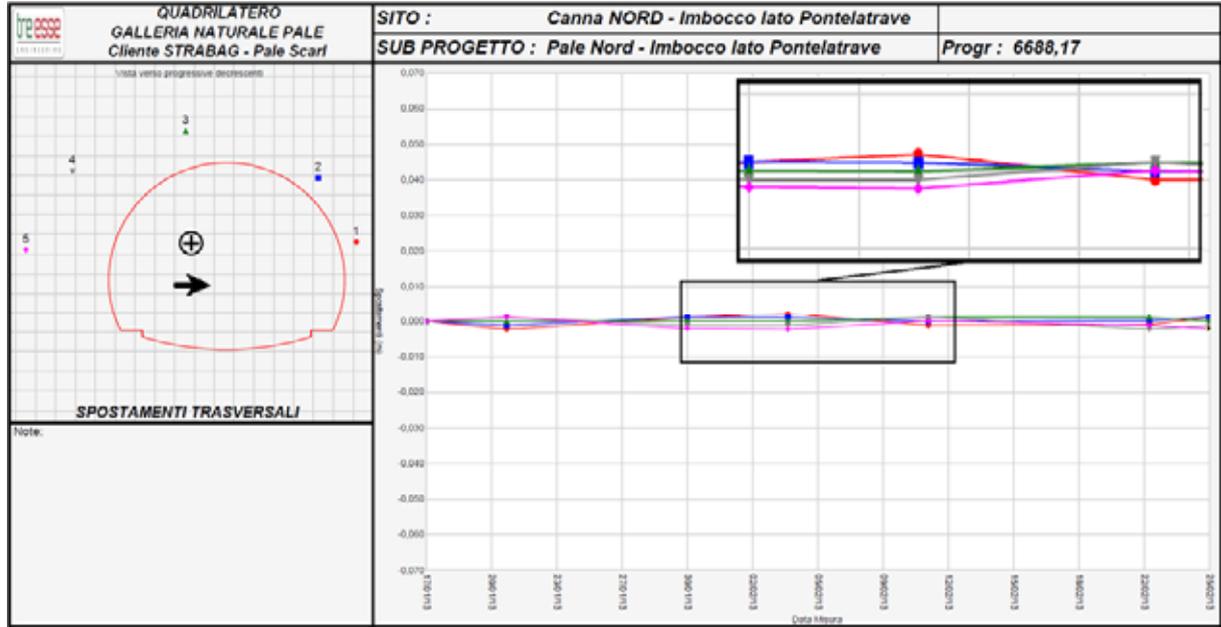
3.3 Analisi del monitoraggio

L'ammasso attraversato presenta, come detto, caratteristiche omogenee (Fig.4). Questo è stato convalidato dalle indagini geologiche effettuate al fronte. Le deformazioni registrate nel piano trasversale all'avanzamento del fronte si sono sempre mantenute in campo elastico, con valori di spostamento e di convergenza inferiori a 0.5 cm, in rapida stabilizzazione.

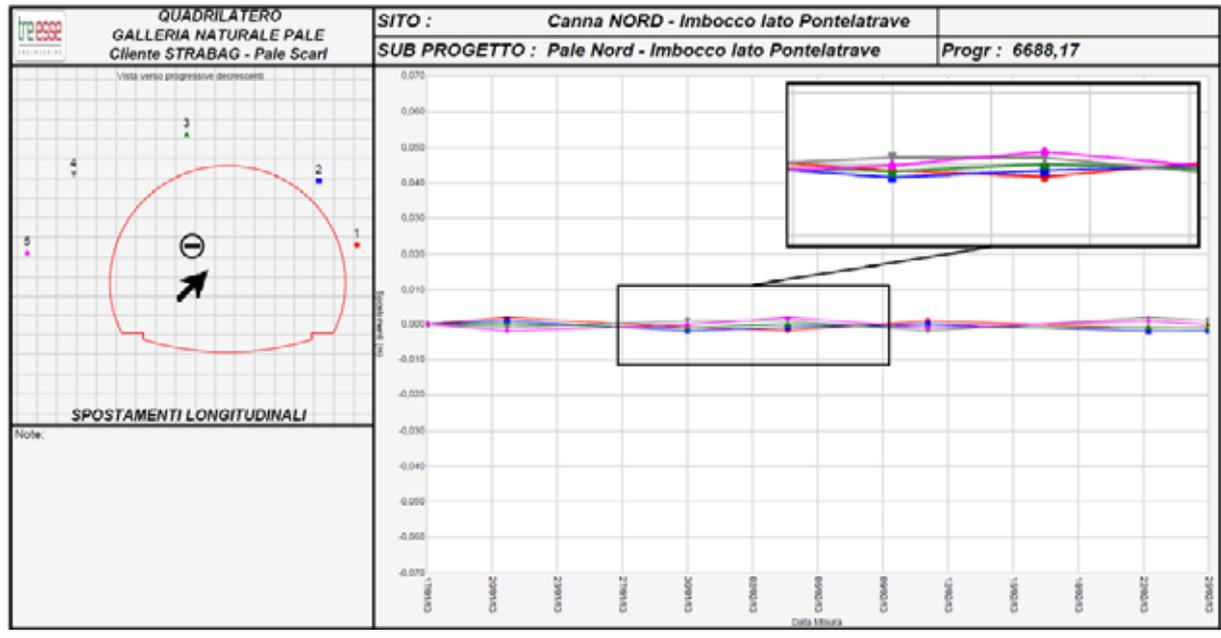
Il differente comportamento delle centine tradizionali rispetto a quello delle centine tubolari risulta evidente confrontando gli spostamenti trasversali e longitudinali misurati nei due casi. La figura 8 mostra gli spostamenti trasversali (Fig. 8a) e longitudinali (Fig. 8b) della centina realizzata con profilo singolo HEB 140 installato ogni 1,50 m. La figura 9 mostra gli spostamenti trasversali (Fig. 9a) e longitudinali (Fig. 9b) di una centina tubolare B.ZERO Tondo, caratterizzata da un diametro di 193,7mm e da uno spessore di 5 mm, installata ogni 1,8 m utilizzando, come sistema di connessione tra le centine la catena doppia incrociata precedentemente descritta. È evidente che gli spostamenti nel piano subiti dalle centine tubolari sono inferiori a quelli corrispondenti subiti dalle centine tradizionali. Nel caso della centina tubolare (Fig. 9), dopo il movimento iniziale dovuto alla stabilizzazione e alla naturale messa in carico del sistema, gli spostamenti si stabilizzano su un livello più o meno costante. Tali valori costanti sono riferibili al comportamento a "sezione mista" (Eurocodice 4), con l'acciaio e il calcestruzzo che collaborano attivamente. Unitamente alla presenza dell'arco continuo in calcestruzzo, ciò garantisce una corretta redistribuzione degli sforzi, dimostrata dalla costanza dello spostamento su punti di misura opposti. Questo fatto si somma alla capacità del sistema di sopportare carichi assiali e eccentrici agenti lungo qualsiasi direzione.

Nel caso della centina tradizionale non è possibile registrare lo stesso comportamento.

Con riferimento allo spostamento longitudinale, confrontando la Fig. 8b con la Fig. 9b, è possibile evidenziare l'apporto delle catene incrociate come elemento di connessione fungente da controvento, che nel caso della centina tubolare si concretizza in spostamenti omogenei e costanti nel tempo, a differenza della centina tradizionale, che mostra spostamenti disomogenei con anche inversioni di segno. Il nuovo sistema di rinforzo è dunque caratterizzato da una maggiore stabilità fuori piano, nonostante il significativo aumento di interasse tra le centine, da 1,5 m per il sistema tradizionale a 1,8 m per la Centina Tubolare B.Zero Tondo.



a)



b)

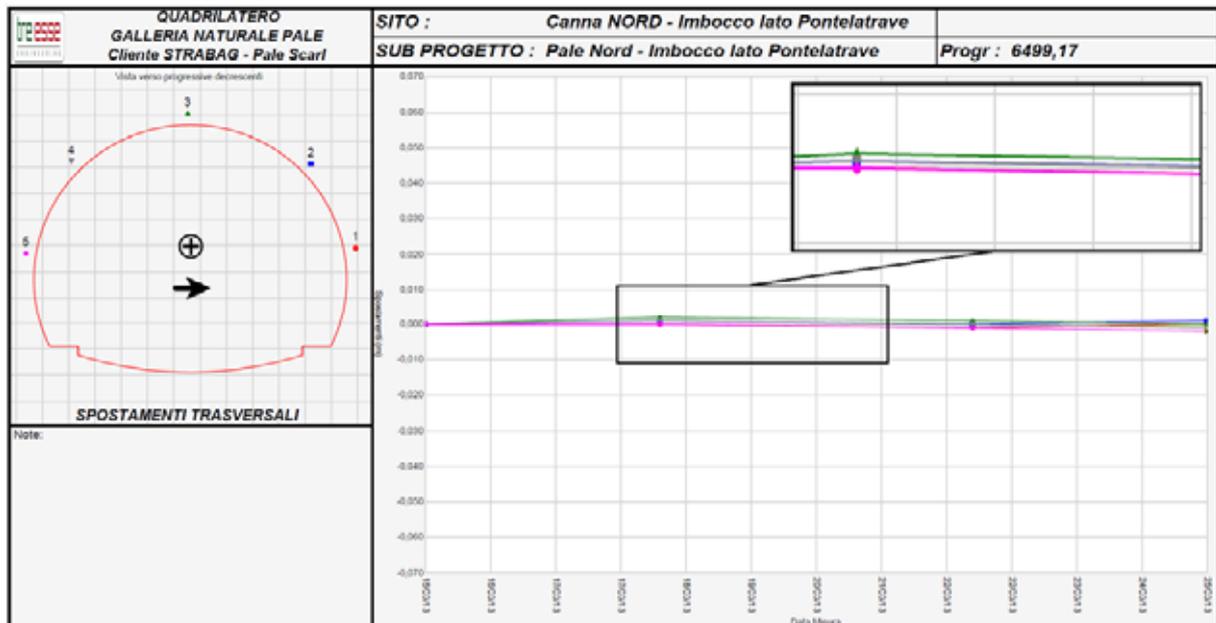
Figura 8. Risultati del monitoraggio per le centine tradizionali costituite da profilo singolo HEB 140 installate ogni 1.50m: a) spostamento trasversale, b) spostamento longitudinale.

3.4 Analisi dei costi

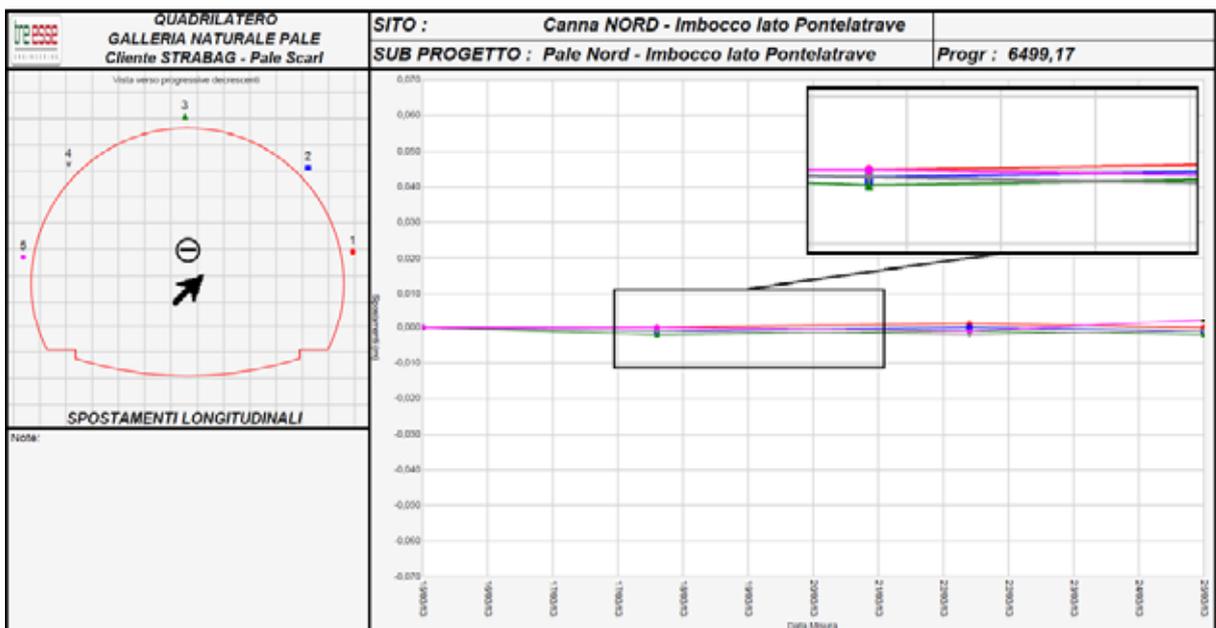
L'installazione del nuovo sistema di rinforzo offre numerosi vantaggi, non solo dal punto di vista tecnico, ma anche da quello economico.

Nel caso in esame (Galleria Pale), a fronte delle buone caratteristiche geologiche dell'ammasso attraversato, l'adozione del nuovo profilo tubolare ha permesso di aumentare del 20 % il passo d'installazione delle centine, dal 1,5 m previsto con il profilo standard HEB 140 al 1,8 m adottato col profilo tubolare sopra descritto, che offre caratteristiche prestazionali superiori rispetto a quelle del profilo aperto originariamente previsto (HEB 140 singolo) (vedasi Fig. 2a). Inoltre, la nuova soluzione

risulta più leggera di quella realizzata con profilati HEB 140 ed è scontato che l'utilizzo di un profilo più leggero e dotato di maggior rigidità consente agli operatori di lavorare in modo più rapido e sicuro.



a)



b)

Figura 9. Risultati del monitoraggio per le centine tubolari costituite da profilo tubolare diametro 193,7mm e spessore 5mm, installate ogni 1.80m con catena doppia incrociata: a) spostamento trasversale, b) spostamento longitudinale.

Nella Tabella 3 è sintetizzato un confronto economico tra le soluzioni esaminate (centina tradizionale e centina tubolare) redatto considerando una galleria di lunghezza pari a un 1 km. In termini di risparmi diretti, si evidenzia, con l'adozione di centine tubolari, una riduzione del numero di centine necessarie (111 in meno), equivalente a un risparmio in peso di 244 tonnellate d'acciaio. Da questo risparmio di materie prime, ne discende un risparmio indotto non meno significativo, dovuto alla riduzione delle fasi operative computate su tutta la galleria.

A seconda delle condizioni geologiche locali, l'applicazione del nuovo sistema di rivestimento di prima fase, costituito da centine tubolari d'acciaio-calcestruzzo, collegate da una controventatura realizzata con catene incrociate e inglobate in un guscio di spritz-beton fibrorinforzato con fibre di acciaio potrebbe, in generale, tradursi in un incremento di produzione variabile dal 10% al 20%.

Tabella 3. Dati Centine

Caratteristiche delle centine metalliche					Analisi 1 km di Galleria			ECONOMIE relative all'adozione della centina tubolare		
Profilo	Acciaio [Grado]	Sviluppo [m]	Passo d'installazione [m]	Peso [kg]	Numero [n°]	Peso [ton]				
HEB 140	S275	27	1,5	1293	667	862	111	CENTINE	16,7%	
Φ 193,7 - sp.5mm	S275	27	1,8	1112	556	618	244	Tonnellate di Acciaio	28,3%	

Un'altra importante economia è dovuta all'assenza di rimbalzo durante la proiezione dello spritz-beton sia tra le centine tubolari che nella fase di riempimento. Da un punto di vista pratico di cantiere, quando un operatore tenta di riempire lo spazio tra le ali di un profilo aperto oppure l'intercapedine tra due profili accoppiati, si registra un rimbalzo del calcestruzzo spruzzato significativo, pari al 50% o più, per i profili accoppiati. Questo problema non si verifica nel caso delle centine tubolari.

4 Conclusioni

Durante le operazioni di scavo di una galleria la sostituzione del sistema di rivestimento di prima fase con rinforzo tradizionale, costituito da profili aperti, con quello realizzato mediante centine tubolari offre numerosi vantaggi che spaziano dall'ambito tecnico, a quello operativo, con ricadute sia in termini d'incremento di sicurezza degli operatori al fronte sia in termini di costo, generando economie importanti. La sezione circolare cava è in grado di farsi carico indistintamente di carichi assiali e/o eccentrici applicati lungo qualsiasi direzione, migliorando le prestazioni del sistema di rivestimento e riducendo il numero di centine necessarie. La centina tubolare riempita di calcestruzzo forma un elemento strutturale composito che si avvantaggia delle eccellenti caratteristiche meccaniche offerte dal calcestruzzo che lavora confinato all'interno della sua struttura d'acciaio, permettendo un'omogenea distribuzione degli sforzi e sviluppando un'eccezionale capacità portante che si traduce in elevata azione di confinamento sulle pareti dello scavo.

Da un punto di vista prettamente operativo, la rigidità del profilo circolare cavo facilita il trasporto e l'installazione delle centine, riducendo al minimo il rischio degli operatori ed elevando conseguentemente la sicurezza della fase operativa che da sempre è ritenuta tra le più rischiose.

I risultati del monitoraggio confermano il comportamento a sezione mista (Eurocodice 4) della centina tubolare riempita di calcestruzzo e l'efficacia del collegamento realizzato mediante catene incrociate, che ne assicura la stabilità fuori piano.

Infine, l'adozione della centina a sezione tubolare riduce drasticamente l'effetto di rimbalzo del calcestruzzo proiettato che si verifica sulle centine tradizionali ed elimina "l'effetto ombra", dovuto alle ali dei profili aperti, che non permette il completo annegamento della sezione.

È opinione degli autori che l'applicazione condotta nella galleria Pale, illustrata nella presente memoria, ha totalmente confermato quanto già desunto dal campo-prove, evidenziando l'incremento di prestazioni del sistema di rivestimento di prima fase realizzato con centine tubolari riempite di calcestruzzo pompato, connesse tra loro con catena doppia, e inglobate in un manto di spritz-beton additivato con acceleranti di presa e rinforzato con rete metallica o fibre in acciaio.

5 Ringraziamenti

Gli autori ringraziano l'Ufficio Tecnico Strabag S.p.A. e in particolare Roberto Manna per il suo costante sostegno e assistenza.

6 Bibliografia

Beniawski, Z. T., 1984. Rock Mechanics design in mining and tunneling, Balkema.

Barton, N. R., Lunde J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomech. Abst.25, No. 13-13.

Bringiotti, M., 2003. Guida al tunnelling: L'evoluzione e la sfida, 2nd Edition, Parma, pp403-406.

Eurocode 4, EN 1994-1-1:2004. Design of composite steel and concrete structures. General rules and rules for buildings.

Hoek E., Bray J.W., 1981. Rock slope engineering, Institution of Mining and Metallurgy, London.

Lunardi, P., 1982. Problemi geomeccanici nella realizzazione delle grandi cavità. Atti del Convegno sul tema "Lo spazio in sotterraneo come nuovo utilizzo del territorio" – Bolzano, p.51-54.

Lunardi, P., Frolidi, P., Fornari, E., 1994. Rock mechanics investigations for rock slope stability assessment, International Journal of Rock Mechanics Vol. 31 N.4, p.323-346.

Lunardi P. (2006), "Progetto e costruzione delle gallerie" Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e Suoli (ADECO-RS) – Editore Hoepli

NTC 2008 – Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 14 gennaio 2008.

Zenti C.L., Lunardi G., Rossi B., Gallovich A. (2012) - "A new approach in the design of first lining steel rib" - Proc. World Tunnel Congress, WTC 2012, Bangkok, Thailand, 18-24 Maggio 2012.

7 Siti Internet

<http://www.stradeanas.it>

<http://www.quadrilaterospa.it>