

TBM scudate

BLOCCO IN ROCCE SPINGENTI - CARICHI SUL RIVESTIMENTO

Per evitare il blocco della TBM, la spinta installata deve essere dimensionata per superare la pressione sviluppata dal terreno, anche nello scenario peggiore.

In rocce con caratteristiche geomeccaniche scadenti subentrano fenomeni quali viscosità e rigonfiamento che è necessario considerare nel dimensionamento del rivestimento delle gallerie.

di

Dott. Giovanni Lombardi e Andrea Panciera

Lombardi SA Ingegneri Consulenti, Minusio-Locarno (Svizzera)

1. INTRODUZIONE

Nel numero di aprile 1996, la rivista Tunnel & Tunneling ha presentato il progetto Guadiaro - Majaceite in Spagna.

Il presente articolo tecnico riferisce sulle analisi condotte dal nostro studio di ingegneria in relazione tanto alla formulazione delle specifiche tecniche per la fresa scudata quanto alle verifiche di carattere geomeccanico del comportamento dell'ammasso roccioso nel breve e nel lungo termine.

I dati tecnici riportati si basano su informazioni procurate dalla società Dragados Ltd., membro della A.T.I. con FCC, cui siamo riconoscenti.

L'Andalusia, al Sud della Spagna, è sempre stata una regione critica per quanto riguarda l'approvvigionamento e la distribuzione delle risorse idriche, soprattutto nei mesi estivi. Per alleviare questa situazione è attualmente in costruzione una galleria di derivazione di 12.2 km per 4.9 m di scavo attraverso le montagne della Sierra Libar e della Sierra Blanquilla verso Cadice.

In **figura 1** è illustrato il profilo geologico di previsione lungo la galleria. Il progetto prevede l'utilizzo di una fresa a doppio scudo con posa di elementi prefabbricati in calcestruzzo ad alta resistenza. Questa particolare tecnologia di scavo è tipicamente adatta per l'esecuzione di gallerie che attraversano formazioni con caratteristiche eterogenee e scadenti. In queste situazioni si sviluppano già sullo scudo carichi molto importanti che possono provocare il blocco della macchina e di conseguenza perdite economiche pesantissime. È quindi necessario progettare la TBM per metterla in condizione di superare l'attrito indotto con forze di spinta sufficientemente alte.

2. GEOLOGIA

Le tratte più critiche lungo il tracciato della galleria, in relazione alle problematiche esposte in questa sede, si localizzano nelle argille dell'Eocene a partire dal km 7+000 fino al portale Nord con alte coperture. Per oltre 3 km la galleria si trova in questo materiale a profondità superiori a 150 m.

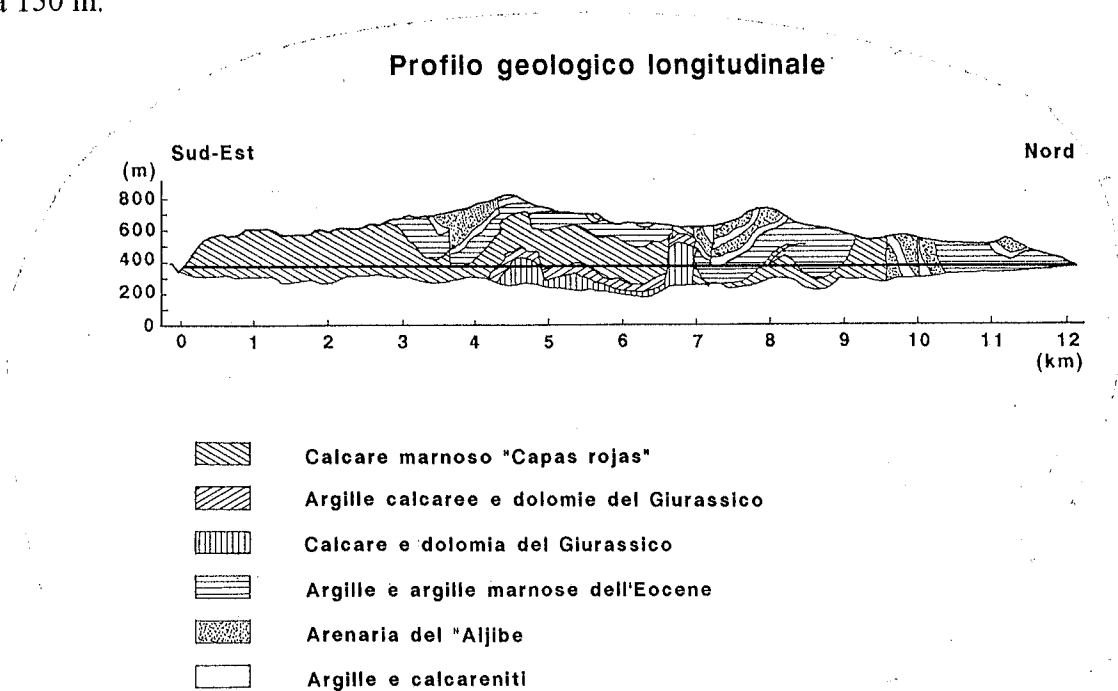


Figura 1

Queste argille sono caratterizzate da una resistenza estremamente ridotta e, data l'importanza della frazione di Montmorillonite (ca. 30 %), da una forte componente di rigonfiamento. In accordo con gli studi geologici e geotecnici di progetto, sono state formulate alcune ipotesi sui parametri geomeccanici come indicato nella tabella sotto esposta. Questi costituiscono la base di calcolo per le analisi necessarie a determinare i carichi nelle differenti situazioni in esame. Poiché questo genere di materiali è caratterizzato da effetti viscosi, oltre che di rigonfiamento. Per tenere in considerazione la maggior resistenza nel breve termine, sono stati aumentati l'angolo di frizione e la coesione di 1° , rispettivamente 0.06 MPa, rispetto ai parametri originali di progetto ritenuti rappresentativi per le condizioni finali. Questi vengono infatti generalmente determinati in seguito a analisi di laboratorio e analisi di casi analoghi, i cui dati sono caratteristici del comportamento a lungo termine.

Caratteristiche della roccia	breve termine	lungo termine
- angolo di frizione	23°	22°
- coesione	0.15 MPa	0.09 MPa
- modulo di deformazione	1 GPa	1 GPa
- dilatanza nella zona di rottura in presenza di rigonfiamento	0	0

La funzione di rigonfiamento è stata assunta con annullamento alla compressione massima corrispondente alla copertura di 400 m. Sono state selezionate due differenti relazioni "rigonfiamento-tensione di confinamento" secondo il diagramma in **figura 2**.

Esse rappresentano l'aumento volumetrico che si verifica in cella di carico edometrico e sono state adottate nel presente caso. Per le analisi numeriche è stato utilizzato un modello di calcolo assialsimmetrico.

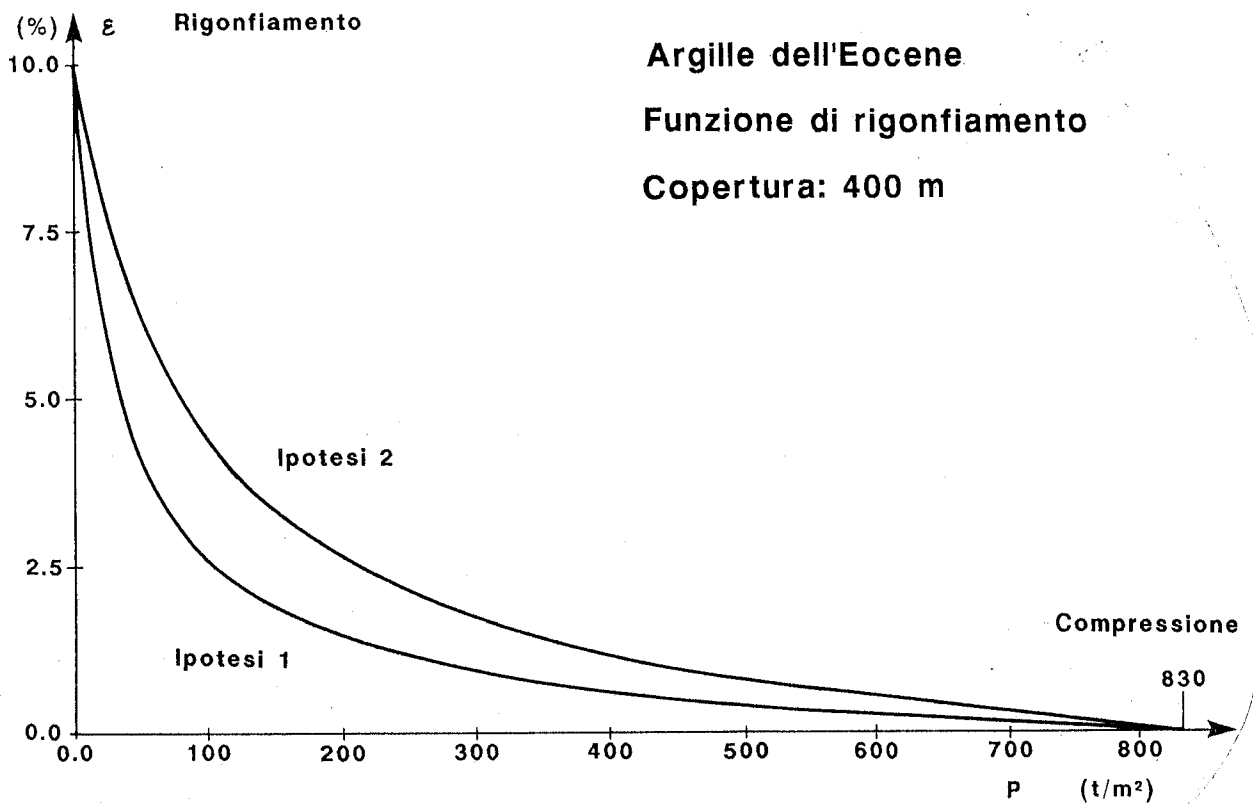


Figura 2

3. METODI DI CALCOLO

Lo sforzo di compressione lungo lo scudo durante l'avanzamento come pure durante le soste prolungate, p.e. per manutenzione, è stato determinato mediante un programma di calcolo sviluppato presso lo studio di ingegneria e consulenza Lombardi SA di Minusio-Locarno (Svizzera).

In breve il programma può dirsi basato su un modello di calcolo pseudo-tridimensionale. Si assume che la roccia sia sottoposta a un campo tensionale simmetrico per rotazione rispetto all'asse della galleria. Si considera l'effetto delle forze frizionali tra dischi forati contigui considerati perpendicolarmente all'asse di avanzamento. Durante le iterazioni di calcolo vengono altresì considerati tanto l'effetto strutturale causato dalla distanza dal fronte di scavo (stato tensionale da tridimensionale a bidimensionale) quanto l'effetto reologico prodotto dal decadi-

mento delle caratteristiche della roccia dal breve verso il lungo termine. Infine viene pure introdotto l'effetto della velocità di avanzamento, la quale comporta stati tenso-deformativi differenti in funzione della viscosità del materiale. Durante il calcolo possono essere introdotte pressioni di sostegno a partire dal fronte lungo l'intero scavo (p.e. effetto di un ancoraggio sistematico, di elementi deformabili con caratteristiche elasto-plastiche o rivestimenti dotati di rigidità predefinita quali conci prefabbricati metallici o in calcestruzzo).

In tal maniera è possibile simulare realisticamente la messa in opera di ogni tipo di supporto durante e dopo lo scavo. Ciò risulta essere una possibilità molto interessante, in particolar modo in caso di utilizzo di fresa meccanizzata TBM, date le caratteristiche di continuità di questa tecnologia di scavo.

Le sollecitazioni sul rivestimento in conci prefabbricati sono state valutate per mezzo del metodo delle linee caratteristiche mediante un programma di calcolo sviluppato presso lo studio di ingegneria e consulenza Lombardi SA di Minusio-Locarno (Svizzera). Esse rappresentano le possibili situazioni di equilibrio tenso-deformativo al bordo di scavo in funzione dei parametri di resistenza della roccia ammessi.

Per la formulazione del programma di calcolo è stato assunto un modello bidimensionale con simmetria di rotazione. Il materiale costitutivo è supposto omogeneo e isotropo secondo il modello di Mohr-Coulomb. Sulla base di considerazioni tridimensionali viene valutato il comportamento in prossimità del fronte. Vengono quindi analizzate le situazioni nel breve e nel lungo termine per determinare lo stato di carico dei conci in prossimità della macchina e il successivo sviluppo delle sollecitazioni fino allo stato finale di esercizio dell'opera. La viscosità della roccia e il suo potenziale di rigonfiamento sono la causa dell'aumento dello stato di sollecitazione del rivestimento.

4. ANALISI

4.1 Spinte installate sulla TBM

Sono state analizzate varie situazioni, tra cui quelle qui esposte rappresentano le più critiche. Queste infatti sono state in massima parte determinanti nella formulazione delle specifiche sulle spinte installate e sulla resistenza dello scudo.

La macchina prevista per lo scavo della galleria di ca. 12 km è una fresa a doppio scudo di lunghezza complessiva 11m. Il suo progetto prevede che tra bordo di scavo e estradosso dello scudo possa svilupparsi una convergenza dell'ordine dei 5 cm radiali (sovrascavo).

Nella **figura 3** seguente si indicano i risultati delle simulazioni effettuate sulla base dei parametri più sopra indicati.

Essenzialmente può notarsi quanto segue:

1. Nel caso di un avanzamento giornaliero di ca. 10 m, la deformazione si sviluppa liberamente dal fronte fino al raggiungimento del contatto con lo scudo. Ciò avviene ovviamente con una deformazione radiale di 5 cm (a). A partire da questo istante la rigidità della struttura metallica fornisce contrasto alle spinte della roccia. Queste si sviluppano fino a un massimo dell'ordine di 1 MPa (100 t/m²) sulla parte terminale, a 11 m dal fronte (b).
2. L'integrazione di queste forze sulla lunghezza dello scudo e sulla circonferenza produce una compressione totale di ca. 115'000 kN. Questa componente, sommata al peso della struttura stessa e in considerazione dell'attrito sviluppato lungo la superficie di contatto (indicato dai produttori in un fattore di ca. 0.25) comporta una forza di spinta necessaria alla ripresa dell'avanzamento dell'ordine dei 30'000 kN (3'000 t). cui deve essere aggiunta la spinta agente sui dischi durante l'avanzamento.
3. In caso di fermo macchina sufficientemente prolungato (c), le trasformazioni nello stato tenso-deformativo proseguiranno ulteriormente. Le deformazioni e il conseguente contatto si sviluppano nel tempo fino immediatamente a tergo del fronte e producono sollecitazioni maggiori poiché il materiale tende già in corrispondenza dello scudo a raggiungere i limiti di resistenza inferiori, caratteristici del comportamento a lungo termine. La compressione to-

tale agente supera in questo caso i 130'000 kN, con una forza totale di spinta necessaria alla ripresa dell'avanzamento di ca. 34'000 kN (3'400 t) cui deve essere aggiunta la spinta agente sui dischi per considerare la situazione più gravosa, nella quale anche il fronte venga a trovarsi prossimo all'instabilità e venga quindi sostenuto dalla testa della macchina.

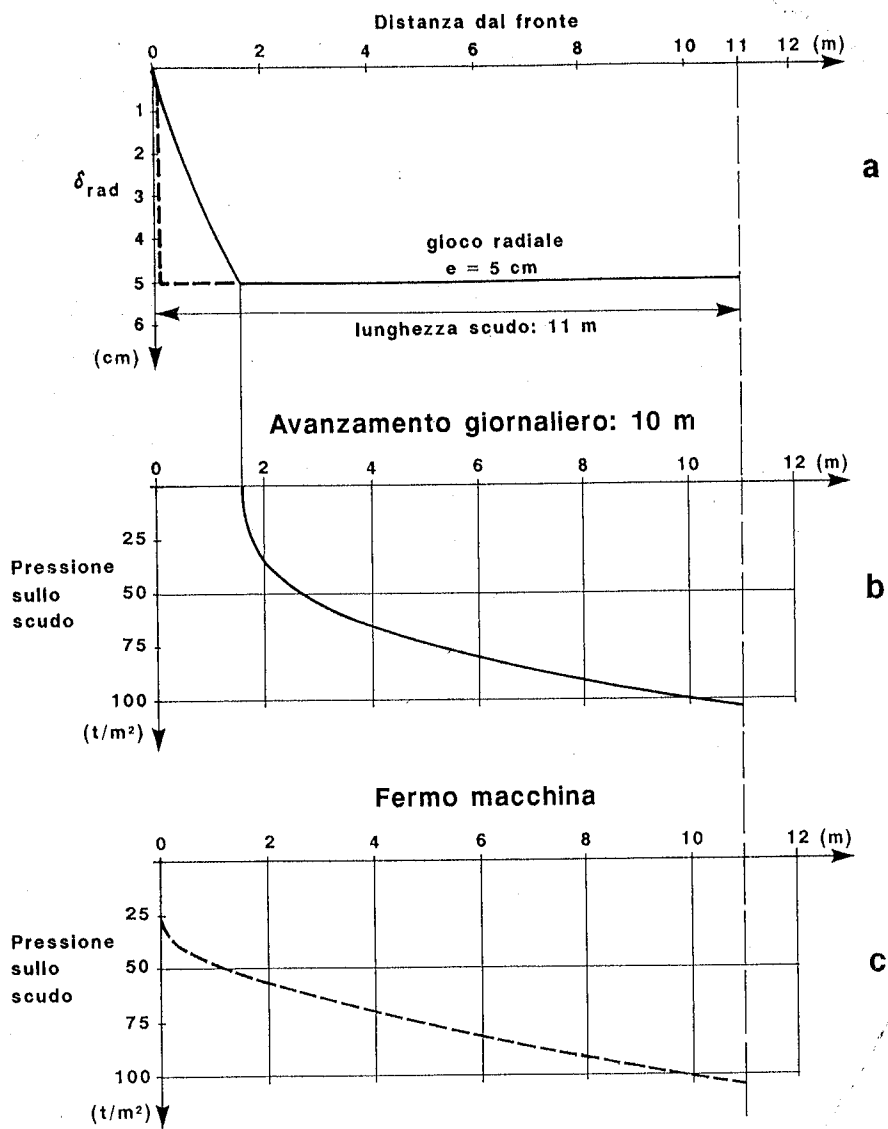


Figura 3

Riassumendo vengono a crearsi le seguenti situazioni:

- avanzamento giornaliero ca. 10 m		macchina ferma
compressione totale	ca. 110'000 kN	ca. 130'000 kN
peso della macchina	ca. 4'800 kN	ca. 4'800 kN
spinta sui dischi	ca. 3'000 kN	ca. 3'000 kN
spinta totale richiesta	ca. 33'000 kN (3'300 t)	ca. 37'000 kN (3'700 t)

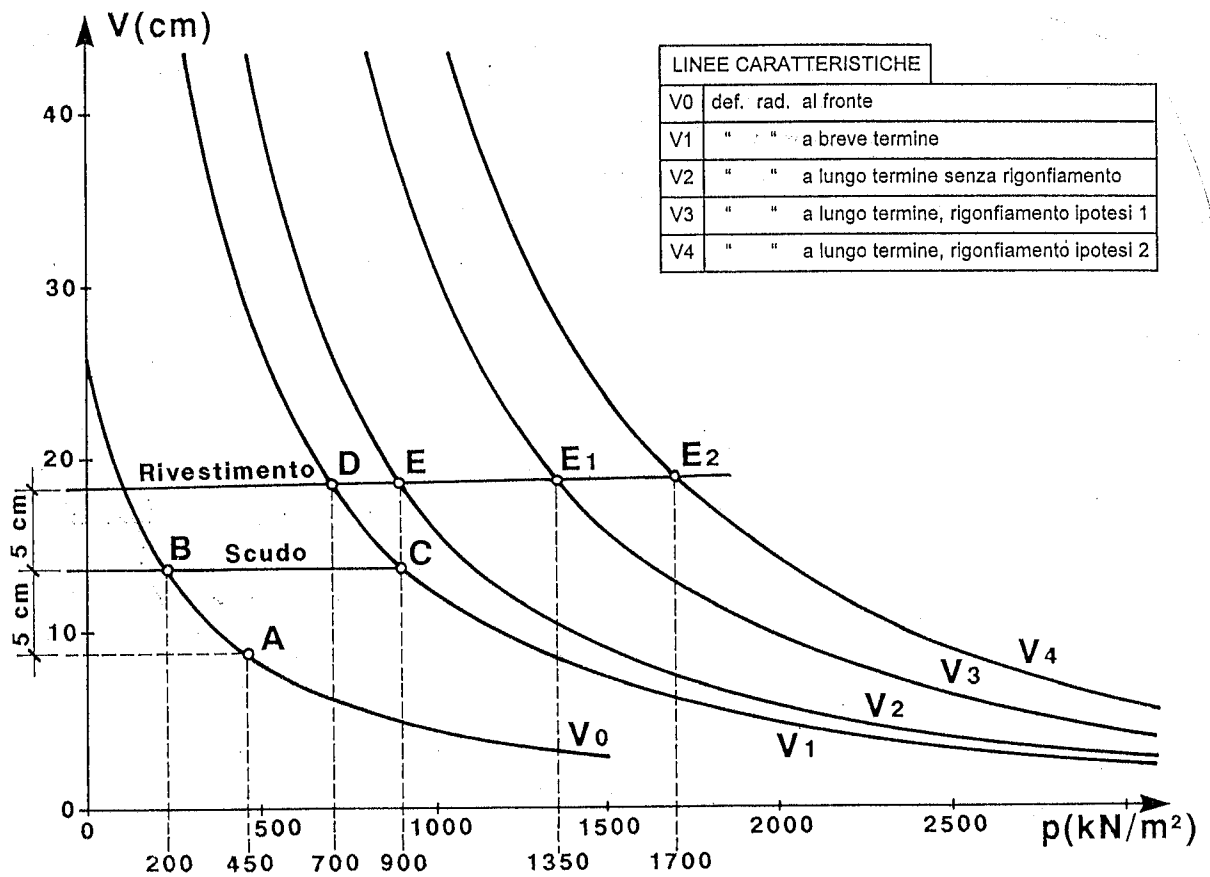
4.2 Rivestimento in conci

Viene logicamente determinato il comportamento dell'opera nel caso di avanzamento senza impedimenti in quanto l'effetto del fermomacchina è trattato separatamente al paragrafo precedente. Alla **figura 4** esposta in seguito si illustra l'analisi completa relativa allo scavo e rivestimento della galleria attraverso le argille dell'Eocene secondo i parametri più sopra indicati.

Essenzialmente può notarsi quanto segue:

1. Il punto **A** rappresenta l'equilibrio al fronte di scavo considerando durante l'avanzamento un effetto della spinta della macchina sul fronte di ca. 3'000 kN (300 t). Da qui la roccia può rilassarsi per complessivi 5 cm, dovuti al sovrascavo di progetto, per caricare lo scudo inizialmente con $200 \div 300 \text{ kN/m}^2$ fino a ca. 900 kN/m^2 (punti **B** e **C**). Questi valori corrispondono a quanto determinato mediante l'analisi esposta al paragrafo precedente.
2. Lo spessore dello scudo occupa lo spazio tra la roccia e l'estradosso dei conci al momento della loro posa e successivo. Malgrado che in seguito allo sfilamento con l'avanzamento della macchina l'intercapedine venga riempita con *pea gravel*, le scadenti caratteristiche delle argille entro cui si scava sono causa di ulteriori convergenze. Queste sono state valutate in ca. 5 cm radiali. Di conseguenza l'equilibrio che viene ad instaurarsi nel breve termine sui conci è quello indicato al punto **D**.
3. Nel lungo termine, l'effetto della viscosità (decadimento dei parametri geomeccanici) e del rigonfiamento si esplica in un aumento dello stato di carico dei conci a deformazione totalmente contenuta secondo la deformabilità dell'anello. Si vengono quindi a determinare gli

equilibri limite indicati ai punti **E**, **E1** e **E2** per le situazioni senza rigonfiamento, con rigonfiamento secondo l'ipotesi 1 e rispettivamente secondo l'ipotesi 2.



EQUILIBRI			
Punto	Localizzazione	Pressione di sostegno [kN/m ²]	Deformazione radiale totale [cm]
A	fronte	450	8.5
B	inizio scudo	200+250	13.5
C	fine scudo	900	13.7
D	rivestimento a breve termine	700	18.7
E	rivestimento a lungo termine senza rig.	900	18.8
E1	rivestimento a lungo termine con rig. ipotesi 1	1'350	18.9
E2	rivestimento a lungo termine con rig. ipotesi 2	1'700	19.0

Figura 4

In questa sede non si entra nel merito del dimensionamento strutturale del rivestimento in conci prefabbricati. Data la sua complessità, il problema merita una trattazione molto più ampia e approfondita. In considerazione delle condizioni geologiche come del metodo di costruzione previsto, le resistenze del calcestruzzo utilizzato ($50 \div 80$ MPa) sono sufficienti a garantire la stabilità del cavo anche nel lungo termine per cui sono previsti carichi massimi di tipo idrostatico di $1'350 \div 1'700$ kN/m². Infatti le compressioni indotte nell'anello sono dell'ordine dei 22 MPa in ragione della concentrazione di tensioni sulla superficie di contatto tra due conci.

5. Conclusioni

Le analisi effettuate indicano la stretta necessità di installare su questa macchina potenze tali da generare spinte nell'ordine di 40÷45 MN (4'000 ÷ 4'500 t). Le specifiche di progetto richiedevano di conseguenza una spinta installata di 40 MN (4'000 t). L'esperienza reale ha dimostrato come tali forze siano state sufficienti a superare le difficoltà nate durante lo scavo senza pertanto comportare il blocco totale dei lavori per procedere allo scavo di cunicoli di by-pass. In progetti analoghi per i quali non era stato effettuato questo genere di valutazione e di conseguenza la forza massima di spinta era determinata unicamente a seguito di esperienze maturate nel tempo, si sono talvolta verificate sia sospensioni dell'avanzamento anche di diversi mesi per poter superare il blocco dello scudo che perdite della macchina.

Quando il margine tra forze installate e valori determinati con l'ausilio del sistema di analisi esposto è molto esiguo (in questo caso ca. 1.1) a causa dell'aumento dei costi che comporterebbe il potenziamento ulteriore dei macchinari, è opportuno che la fresa scudata sia attrezzata mediante sistemi di lubrificazione del mantello tramite bentonite o schiume sintetiche per facilitare lo scorrimento lungo la roccia.

Per quanto ci è noto, verrà pubblicato un articolo (altri autori) sullo sviluppo attuale dei lavori di costruzione.

Nel complesso si può comunque affermare che l'esperienza è stata molto positiva. Infatti la TBM a doppio scudo ha subito solo 5 arresti forzati ed è stato possibile sbloccarla con facilità procedendo a liberare parzialmente la superficie dello scudo attraverso l'apertura in corrispondenza dell'articolazione tra gli scudi. Il contatto tra roccia e scudo è stato eliminato su al massimo il 10% della superficie totale. Ciò significa che il margine summenzionato di 1.1 tra spinta installata e attrito sviluppato va portato a ca. 1.25. Di conseguenza in sede progettuale si considera più appropriato valutare le spinte adottando valori tra 1.4 e 1.5 relativamente a detto margine.

BIBLIOGRAFIA

- /1/ Giovanni Lombardi
“Berücksichtigung der räumlichen Einflüsse im Bereich der Ortsbrust”
Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, 1. Nationale Tagung über Felsholraumbau, Essen, 18./19. März 1974
- /2/ Giovanni Lombardi, Gian F. Rechsteiner, Walter Amberg
“An elasto-plastic analysis of the stress-strain state around an underground opening”
3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics, Denver (USA), 1974
- /3/ Giovanni Lombardi e Walter Amberg
“L’influence de la méthode de construction sur l’équilibre final d’un tunnel”
4^{ème} Congrès International de la Mécanique des Roches, Montreux (CH), 1979
- /4/ Giovanni Lombardi
“Bau von Tunneln bei grossen Verformungen des Gebirges”
Congres on Tunneling Tunnel 81, Düsseldorf (D), 11.-13.6.1981
Sonderdruck aus Broschüre Internationaler Kongress
- /5/ Giovanni Lombardi
“Underground openings in swelling rock”
First national conference on Case Histories in geotechnical engineering
Lahore, November 1994
- /6/ Mike Page
“Tunneling technology to prevent water shortage”
Tunnel & Tunneling, April 1996

Minusio, dicembre 1996

Lo/AP/wet

Dr. Giovanni Lombardi

Ing. Andrea Panciera