

CONVEGNO DI
SCAVO MECCANIZZATO INTEGRALE DI GALLERIA

Roma, 13-14-15 maggio 1997

TBM scudate
BLOCCO IN ROCCE SPINGENTI

di

Andrea Panciera e Giovanni Piccolo

Lombardi SA Ingegneri Consulenti, Minusio-Locarno (Svizzera)

TBM scudate

BLOCCO IN ROCCE SPINGENTI

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

Andrea Panciera e Giovanni Piccolo

Lombardi SA Ingegneri Consulenti, Minusio-Locarno (Svizzera)

1. INTRODUZIONE

Sempre più al giorno d'oggi la tendenza nell'esecuzione di gallerie è la meccanizzazione integrale dello scavo e della posa in opera del rivestimento.

Nel futuro è facile prevedere ulteriori evoluzioni e un maggiore utilizzo di queste tecnologie.

Ciò è dovuto sicuramente all'accumulo di sempre più numerose esperienze in questo campo tanto dal punto di vista esecutivo (meccanica, idraulica, elettromeccanica e gestione della TBM, ...), quanto progettuale dell'opera sotterranea (sempre maggior accuratezza negli studi preliminari sia geologici che geomeccanici, nel riconoscimento di tratte omogenee, nella determinazione di potenza e natura di faglie e sovrascorrimenti, nella formulazione di "worst case analysis").

Grazie a queste esperienze (soprattutto esecutive), malgrado la grande evoluzione che ha investito pure i mezzi di calcolo (uso ormai generale di elaboratori elettronici, metodi ad elementi finiti, a differenze finite, ecc.), una gran parte degli elementi che concorrono alla progettazione ottimale della macchina sono ancora legati a considerazioni empiriche o semi empiriche.

Senza nulla togliere all'importanza dell'esperienza diretta, è nostra intenzione in questa sede (forse a causa della nostra "estrazione culturale" di ingegneri progettisti) affrontare il problema del blocco di TBM scudate in rocce spingenti dal punto di vista analitico e calcolistico della meccanica delle rocce e presentare un caso specifico di applicazione delle considerazioni che andiamo ad esporre.

Questo non è un esercizio sterile, fine a sé stesso, in quanto sempre più gallerie si trovano ad attraversare formazioni difficili, spingenti, con presenza di disturbi tettonici importanti.

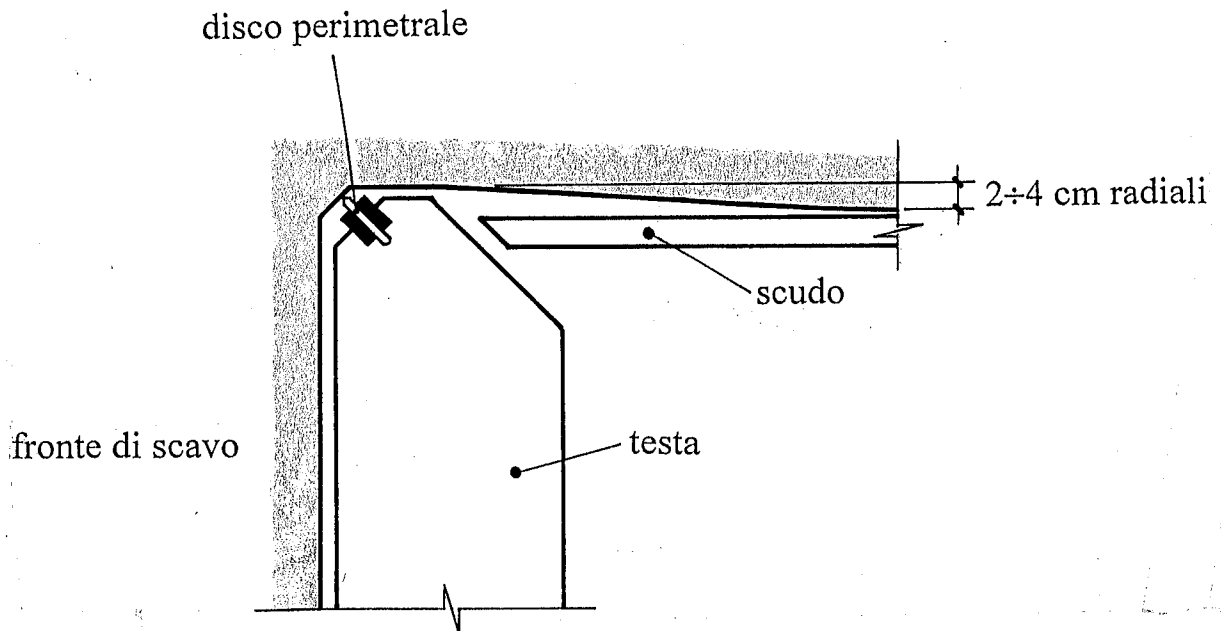
Un ulteriore motivo risiede nella volontà di disporre di mezzi adeguati alla formulazione di progetti finalizzati all'utilizzo di TBM corredati delle necessarie prescrizioni tecniche generali. E ciò già dalla fase di studio del progetto (generalmente compito dei servizi e committenti), non solo per la formulazione e l'analisi di varianti esecutive.

2. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA E METODO DI ANALISI

Una TBM scudata (o doppio scudata) che avanza all'interno della roccia può essere assimilata ad un cilindro di acciaio di dato raggio che si sposta a una data velocità in un medio generalmente isotopo e omogeneo, quanto meno a tratti distinti.

In via generale le prime difficoltà sorgono proprio nell'allestimento di un modello geologico realistico (o quanto meno plausibile) dell'area in cui si intende progettare e poi scavare la galleria e nella suddivisione del tracciato in tratte omogenee. Malgrado l'interesse e l'importanza dell'argomento, non intendiamo in questa sede affrontare il problema dei rapporti tra geologia, geomeccanica, esigenze progettuali, ecc..

Il punto di contatto della roccia sullo scudo (e quindi il primo punto dello scudo in compressione) non è forzatamente l'inizio geometrico dello scudo o perfino della testa fresante a causa del sovrascavo fisiologico di 2÷4 cm radiali imposto per evitare che la macchina si incastri (o maggiore se la macchina è adeguatamente attrezzata allo scopo).



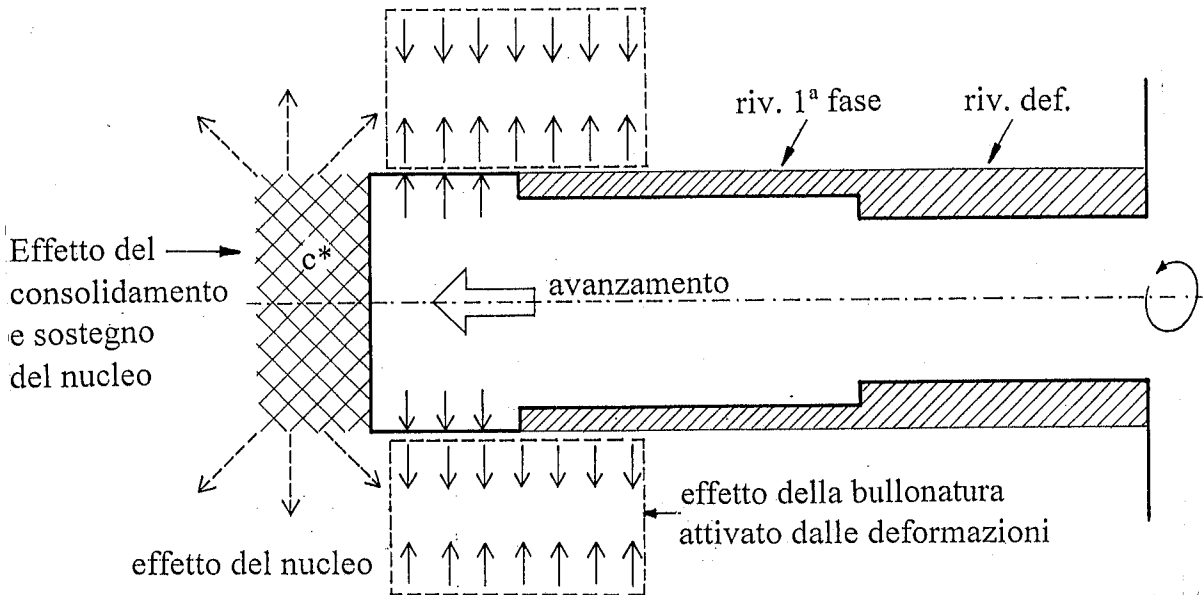
L'aumento delle sollecitazioni lungo lo scudo è causato

- dall'effetto tridimensionale dovuto all'affievolirsi con la distanza dal fronte del sostegno e della deviazione dei flussi tensionali sviluppati dal nucleo di roccia davanti alla testa fresante,
- dal progressivo deterioramento delle caratteristiche del materiale tra la resistenza di picco e residua.

Questi fenomeni possono essere "filtrati" dall'effetto temporale in caso di proprietà viscose della roccia (pensiamo con ciò alle molteplici formazioni marnose, scistose, argillitiche, di cui è ricco l'Appennino).

Per l'analisi numerica si è ricorso a un programma di calcolo che può applicarsi anche ad altri problemi connessi con l'avanzamento (non solo meccanizzato) in rocce con caratteristiche elasto-plastiche e viscose.

φ, c, E elasto-plastico breve e lungo termine
 k parametro di viscosità



In breve il programma può dirsi basato su un modello di calcolo pseudo-tridimensionale, nel quale si assume che la roccia è 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, sotto forma di trasferimento di forze massicce. Durante le iterazioni di calcolo vengono altresì considerati tanto l'effetto geometrico causato dalla distanza dal fronte di scavo (stato tensionale da tridimensionale a bidimensionale) quanto l'effetto reologico prodotto dal decadimento delle caratteristiche della roccia dal breve verso il lungo termine. Infine viene pure introdotto l'effetto della velocità di avanzamento, la quale provoca stati tenso-deformativi differenti in funzione della viscosità del materiale. Durante il calcolo possono essere introdotte pressioni di sostegno o forze massicce a partire dal fronte lungo l'intero scavo (p.e. per simulare l'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. In particolar modo ciò risulta molto interessante in caso di utilizzo di fresa meccanizzata TBM, date le caratteristiche geometriche (scavo circolare) e di continuità di scavo di questa tecnologia, almeno fintanto che non subentrino interferenze.

Non intendiamo entrare nel dettaglio del metodo di calcolo e della struttura e possibilità d'impiego del programma per ragioni tematiche e di tempo. Reputiamo più interessante presentare un esempio pratico. Si tratta dell'analisi di un caso specifico da noi effettuata in sede progettuale (e non di back-analysis) nel 1994, relativa al progetto "Túnel de transvase Guadja-ro-Majaceite" vicino a Cadice in Spagna. In quella sede siamo stati interpellati dal General Contractor allo scopo di formulare le specifiche tecniche per la macchina di scavo.

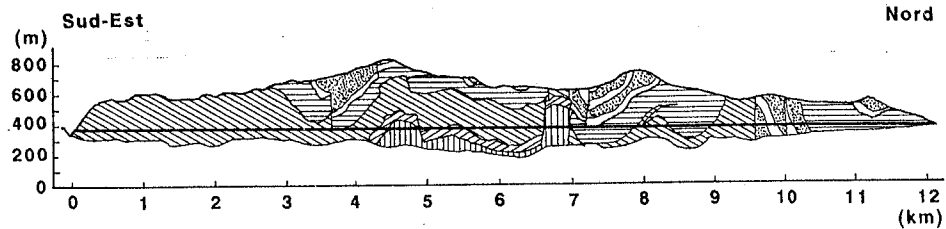
I dati citati sono messi gentilmente a disposizione della Associazione Temporanea d'Imprese Dragados e FCC.







3. ANALISI DI UN CASO SPECIFICO

Ci riferiamo a una galleria di derivazione di ca. 12 km di lunghezza per 4.9 m di diametro. Il profilo geologico mostra una divisione essenzialmente in due tratte distinte del tracciato.

- da nord (attacco) per ca. 5 km si attraversano scisti argillosi dell'Eocene con coperture superiori a 150 m (fino a 400 m), caratterizzati da forte presenza di Montmorillonite e resistenze ovviamente basse;
- verso sud si entra quindi in dolomie e calcari di varia natura con coperture inferiori e caratteristiche decisamente migliori.

Profilo geologico longitudinale

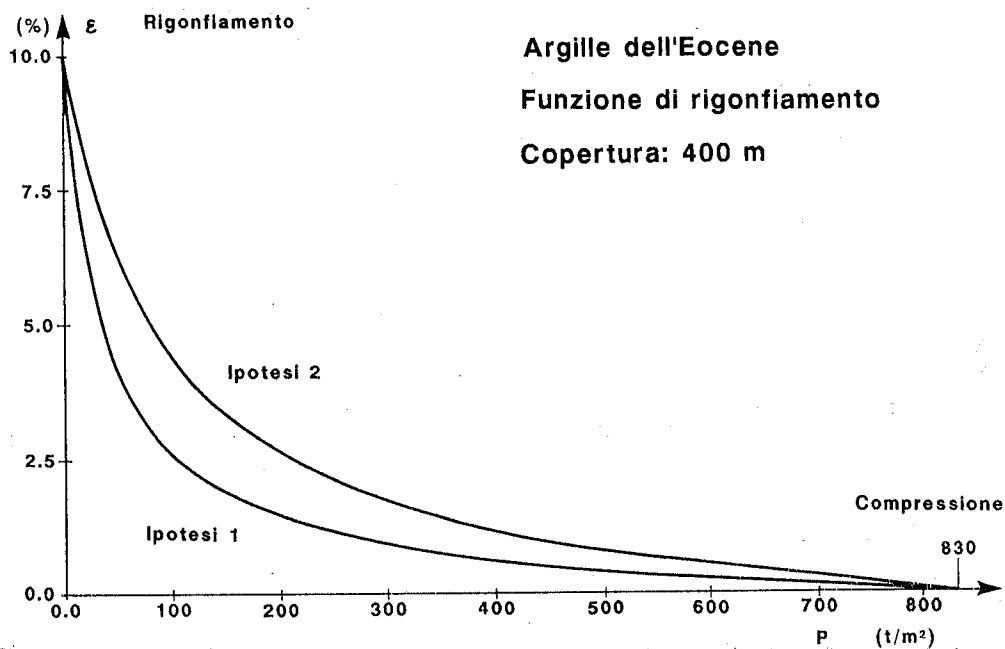


-  Calcare marnoso "Capas rojas"
-  Argille calcaree e dolomie del Giurassico
-  Calcare e dolomia del Giurassico
-  Argille e argille marnose dell'Eocene
-  Arenaria del "Aljibe"
-  Argille e calcareniti

I parametri di ammasso utilizzati per le analisi considerano il decadimento delle caratteristiche di resistenza della roccia nel tempo.

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 in presenza di rigonfiamento	-	-
– resistenza a compressione (Mohr-Coulomb)	0.45 MPa	0.27 MPa

La funzione di rigonfiamento deriva da prove in cella edometrica assumendo la copertura di 400 m quale compressione di annullamento e due differenti andamenti della funzione stessa.

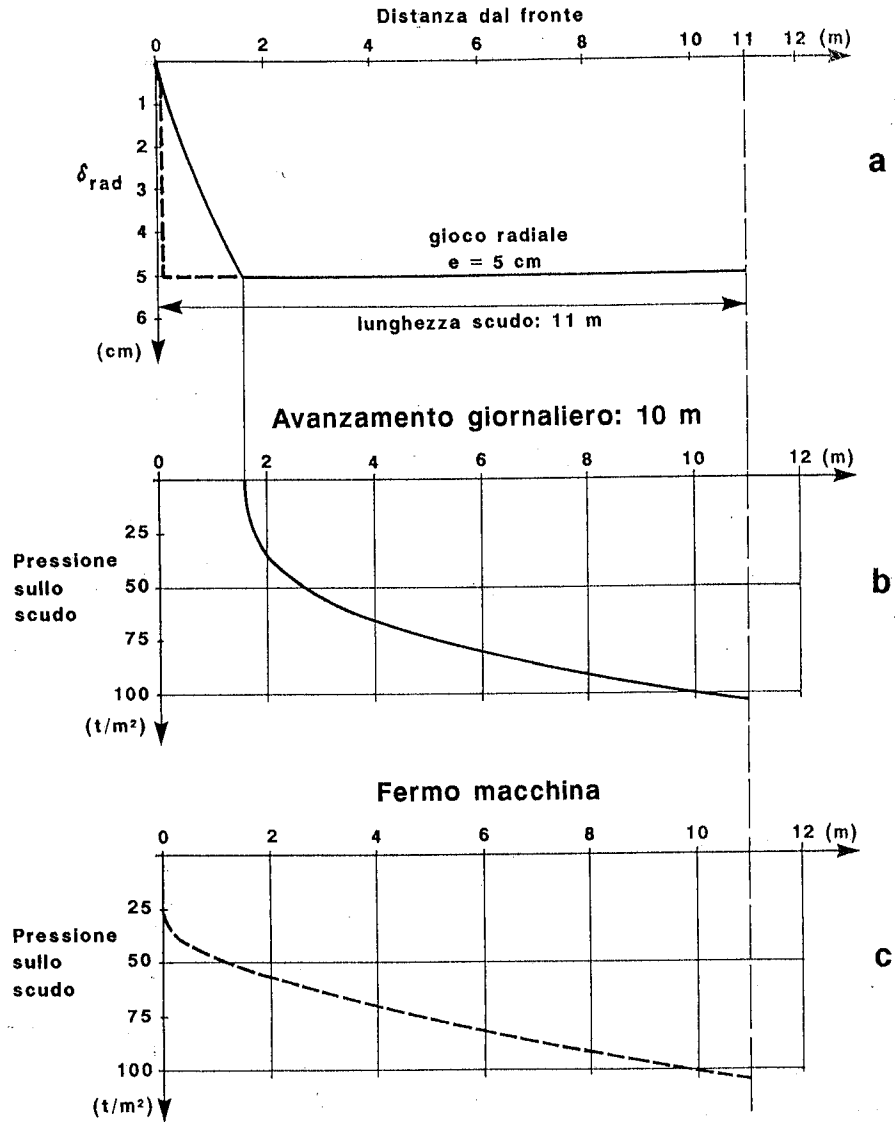


Dovendo queste analisi servire a formulare le specifiche tecniche della macchina, sono state verificate le situazioni più critiche:

- avanzamento con produzione giornaliera media di 10 m
- fermo macchina.

Il progetto prevedeva l'utilizzo di una fresa doppio scudata di lunghezza complessiva di ca. 11 m, diametro di scavo di 4.9 m e possibilità di sovrascavo per un totale di 5 cm radiali.

I diagrammi presentati contengono i risultati delle simulazioni effettuate in base ai parametri appena citati durante l'avanzamento giornaliero di 10 m (linea continua) e in caso di fermo macchina (linea tratteggiata).



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 calcolato dell'ordine di 1 MPa ($100 t/m^2$) 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 33'000 kN (3'300 t), comprensiva, nel peggiore dei casi, della spinta sui dischi.
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 totale 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.

Riassumendo vengono a crearsi le seguenti situazioni:

	avanzamento 10 m/giorno	macchina ferma
compressione totale	115'000 kN	130'000 kN
peso macchina	4'800 kN	4'800 kN
spinta sui dischi	3'000 kN	3'000 kN
spinta totale	33'000 kN	37'000 kN

4. 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) con un margine di ca. 1.1 sulle valutazioni effettuate. 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 salvo alcuni arresti poi superati. 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 sospensioni dell'avanzamento anche di diversi mesi per poter superare il blocco dello scudo. Negli eventi peggiori si è verificata la perdita 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.

Nel complesso si può affermare che l'esperienza è stata positiva. Infatti la TBM a doppio scudo ha subito solo 5 arresti forzati ed è stato possibile sbloccarla 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, per quanto ci è noto, per un massimo del 10% della superficie totale. Ciò significa che il margine tra spinta sviluppata dalla macchina e attrito valutato si pone a ca. 1.25 a causa del rapporto tra superficie totale ammessa per le verifiche e superficie realmente a contatto con la roccia.

In sede progettuale consideriamo più appropriato valutare le spinte da installare 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 Felshohlraum-
bau, 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, 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, Vol. I,
pp. 475-484
- /4/ Giovanni Lombardi
“Bau von Tunneln bei grossen Verformungen des Gebirges”
Congress on Tunnelling 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 1984
- /6/ Mike Page
“Tunneling technology to prevent water shortage”
Tunnel & Tunneling, April 1996