

UN NUOVO MODELLO TRIDIMENSIONALE PER LA SIMULAZIONE DELLO SCAVO MECCANIZZATO DI GALLERIE PROFONDE IN CONDIZIONI DIFFICILI

Janutolo Michele

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino
michele.janutolobarlet@polito.it

Kai Zhao

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino

kai.zhao@polito.it

Giovanni Barla

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino
giovanni.barla@polito.it

Sommario

Per gallerie lunghe e profonde come quelle attualmente in costruzione nell'arco alpino, lo scavo meccanizzato con TBM è quasi obbligatorio poiché riduce in modo significativo costi e tempi di costruzione. Tuttavia alcune problematiche si pongono per l'adozione di questo metodo nel caso di condizioni geotecniche difficili. Due rischi importanti sono il comportamento fragile, in rocce di buona qualità, e il comportamento spingente, in rocce di qualità scadente. In queste condizioni, l'interazione complessa tra macchina di scavo, rivestimento e ammasso roccioso deve essere analizzata accuratamente: questo è possibile tramite l'elaborazione di un modello tridimensionale che comprenda tutte queste componenti, come è stato applicato in questa nota a due casi relativi alle Gallerie di Base del Brennero e della Torino-Lione. La TBM di riferimento utilizzata è quella universale a doppio scudo, la cui concezione è molto sofisticata ed idonea ad affrontare entrambe le situazioni.

Introduzione

Negli ultimi anni, lo scavo meccanizzato con TBM è sempre più diffuso nel caso di gallerie lunghe e profonde poiché contribuisce in modo significativo a ridurre costi e tempi di costruzione. Questo vale in particolare per le gallerie dell'arco alpino, dove le TBM sono già state ampiamente usate per lo scavo delle Gallerie di Base del Löttschberg e del Gottardo e nel cunicolo esplorativo di Aica, lungo l'asse della Galleria di Base del Brennero.

Si può peraltro affermare che lo scavo delle gallerie principali del Brennero e della Torino-Lione avverrà per la maggior parte con metodo meccanizzato. E' da rilevare inoltre che, ad esempio, lo scavo attualmente in corso delle gallerie di sicurezza dei trafori del Gran San Bernardo e del Fréjus avviene con TBM scudate e che gli stessi trafori erano stati eseguiti invece, nella seconda metà del secolo scorso, in tradizionale: ciò dimostra che a parità di condizioni attualmente si preferisce il metodo meccanizzato.

Rimangono tuttavia alcuni problemi aperti quando si affrontano condizioni difficili come il comportamento spingente, quello fragile con fenomeni di *spalling* e *rock bursting*, l'attraversamento di zone di faglia e importanti venute d'acqua. Per esempio, la fattibilità tecnica ed economica dello scavo meccanizzato in condizioni di roccia fortemente spingente è ancora dubbia, date le esperienze negative al riguardo. In quanto segue si tratterà delle due prime problematiche.

Per la progettazione dello scavo meccanizzato in tali condizioni, la complessa interazione tra ammasso roccioso, macchina e rivestimento necessita di essere analizzata accuratamente e l'uso di modelli tridimensionali che includano tutte queste componenti è quasi obbligatorio per una simulazione il più possibile aderente alla realtà, specie nel caso di una TBM a doppio scudo, più complessa rispetto ad una aperta o a singolo scudo. In letteratura, infatti, in

particolare nel caso di gallerie profonde, sono disponibili pochi modelli interamente tridimensionali.

Caratteristiche delle TBM universali a doppio scudo e progetto

Nell'ultimo decennio, l'uso di TBM a doppio scudo e di grande diametro (attorno ai 9-10 m) è notevolmente aumentato. Il principale vantaggio di questo tipo di TBM è la capacità di operare secondo due modalità diverse: quella base (che garantisce un'elevata produttività), facendo uso dei grippers, in rocce da media a buona qualità, e quella monoscudo, tramite l'uso dei cilindri di spinta ausiliari, per rocce di qualità scadente.

Come descritto da Grandori e Romualdi (2006), le principali innovazioni di questo tipo di macchine sono:

- Lunghezza totale della TBM nella gamma di 11 m, così che la redistribuzione delle tensioni non si sia ancora sviluppata completamente e si riduca perciò il rischio di blocco in condizioni spingenti
- "Conicità" dello scudo in più passi, con diametro dello scudo posteriore molto più ridotto rispetto a quello frontale
- Nuova progettazione dell'articolazione telescopica per eliminare il problema di intasamento del giunto telescopico sia per scaglie di roccia generate da rottura fragile che da materiale spingente
- Dispositivi per sovrascavo controllato per aumentare l'intercapedine tra la roccia e lo scudo (e i successivi conci).

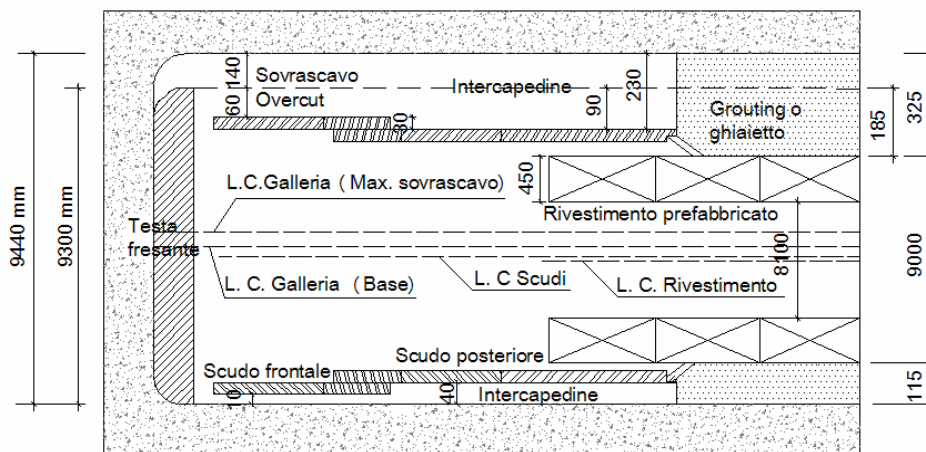


Figura 1: Schema della geometria della TBM considerata

Si è quindi fatto riferimento a una macchina di questo tipo prendendo in considerazione le Gallerie di Base del Brennero e della Torino-Lione, dove sono previsti in alcuni tratti fenomeni di comportamento fragile o di tipo spingente, per cui la stessa macchina deve essere tale da poter affrontare in modo soddisfacente entrambe le condizioni, se si vuole ridurre il più possibile il ricorso al metodo tradizionale.

Il diametro interno di queste gallerie è 8.1 m. Come si può vedere in fig. 1, da questo valore si sono aggiunti gli spessori del rivestimento e della conicità e si raggiunge un diametro di scavo di 9.3 m nel caso di roccia competente mentre di 9.44 m aggiungendo il sovrascavo massimo, fissato a 14 cm. La massima forza ausiliaria di spinta è posta pari a 80 MN.

Modello numerico

Il modello 3D che, grazie alle condizioni di simmetria assunte, comprende solo metà dell'intera galleria, è stato creato con il codice ad elementi finiti midas GTS (TNO

DIANA_{BV}). Esso comprende tutte le principali componenti di una TBM:

- Gli scudi (frontale e posteriore), rappresentati con elementi *plate* applicati al bordo dello scavo
- La testa fresante, simulata mediante elementi *plate* al fronte di scavo corrente e su cui si applica una pressione pari alla massima spinta alla testa divisa l'area
- Il *grouting* o il ghiaietto, introdotti mediante elementi solidi: si è usato ghiaietto con iniezioni di malta cementizia nel caso di ammassi rocciosi competenti, o miscela cementizia bifase (prima fluido e poi indurito) nel caso di ammassi rocciosi a comportamento spingente
- Il rivestimento, rappresentato mediante elementi *plate*, senza considerare la suddivisione in conci
- I *grippers*, simulati con elementi *plate* al bordo dello scavo, su cui è applicata la corrispondente pressione; sono posizionati ad una certa distanza dal fronte di scavo e la loro posizione viene spostata a passi di 2 m con l'avanzamento
- La pressione dovuta ai cilindri ausiliari, applicata al bordo dell'ultimo anello di rivestimento installato, nel caso di comportamento spingente, al posto dei *grippers*.

A tutte queste componenti, che seguono una legge di comportamento lineare elastica con i parametri dei rispettivi materiali, è applicato il peso proprio. Agli elementi scudo viene assegnato un peso specifico equivalente al peso della macchina.

L'avanzamento della TBM è simulato seguendo la tecnica "passo a passo" in modo da riprodurre la reale successione delle fasi di scavo, con lunghezza del passo pari a 1 m e numero di passi sufficiente a raggiungere la condizione di stato stazionario.

L'aspetto principale del modello consiste nella corretta rappresentazione dell'interazione tra il processo di costruzione e l'ammasso roccioso e, in particolare, tra gli scudi e l'ammasso roccioso relativo alla chiusura dell'intercapedine presente tra essi che, come si evince in figura 1, non ha uno spessore costante.

Nel caso di roccia competente con comportamento fragile, le convergenze sono localizzate alle sole zone fatturate, per cui la chiusura dell'intera intercapedine non è prevista e si assume che il contatto avvenga in modo significativo solo nell'arco rovescio dello scudo frontale, laddove l'intercapedine è minima.

Nel caso di roccia con comportamento spingente, le convergenze sono elevate nell'intera sezione: il contatto avviene sicuramente nell'arco rovescio dello scudo anteriore e, ad una determinata distanza, l'intera intercapedine può chiudersi, sia in corrispondenza dello scudo frontale che di quello posteriore.

Monitorando l'andamento del contorno deformato (o LDP, *Longitudinal Deformation Profile*) in calotta ed arco rovescio, per ogni passo di scavo è possibile valutare quando questo eccede lo spessore dell'intercapedine e dunque attivare apposite proprietà dell'interfaccia tali da consentire il contatto per le parti di scudo successive a quella determinata posizione.

Applicazione del modello nel caso di ammasso roccioso con comportamento fragile

Come esempio di ammasso roccioso con comportamento fragile si considera lo scavo di una delle due canne della futura Galleria di Base del Brennero in corrispondenza degli ultimi chilometri del cunicolo esplorativo di Aica, completato nel 2010 (Barla et al., 2010a).

La formazione incontrata è il granito di Bressanone, con le seguenti proprietà per la roccia intatta: $E=25$ GPa (modulo elastico); $\nu=0.25$ (coefficiente di Poisson); $\sigma_{ci}=130$ MPa (resistenza a compressione della roccia intatta); $\sigma_{ti}=8.1$ MPa (resistenza a trazione della roccia intatta); $CI=58.5$ MPa (soglia di inizio fratturazione, come definito da Diederichs e Martin, 2010).

Data l'elevata copertura (1350 m), in presenza di stati tensionali anisotropi, l'ammasso roccioso avrà un comportamento fragile con fenomeni di *spalling*. Diversi modelli sono stati elaborati per riprodurre tali fenomeni, basati su un approccio continuo o discontinuo o ibrido.

Uno di questi è quello sviluppato da Diederichs (2007), basato sull'ipotesi di continuo equivalente e una legge costitutiva elasto-plastica idealmente fragile, in grado di definire la forma, la profondità e l'entità della fratturazione.

Il modello fa riferimento al criterio di Hoek-Brown generalizzato, ma con i parametri di picco e residui determinati con una procedura diversa, sulla base di σ_{ci} , σ_{ti} e CI. Come si può vedere in fig. 2, tale modello è poi adattato al criterio di Hoek-Brown tradizionale con parametri modificati ottenuti con un procedimento di interpolazione (criterio modificato). Lo stato tensionale in situ è assunto come segue: σ_v (tensione verticale) = 23.9 MPa; σ_h (tensione orizzontale) = 47.8 MPa (i.e. $K_0=2$); σ_z (tensione lungo l'asse della galleria) = 35.9 MPa.

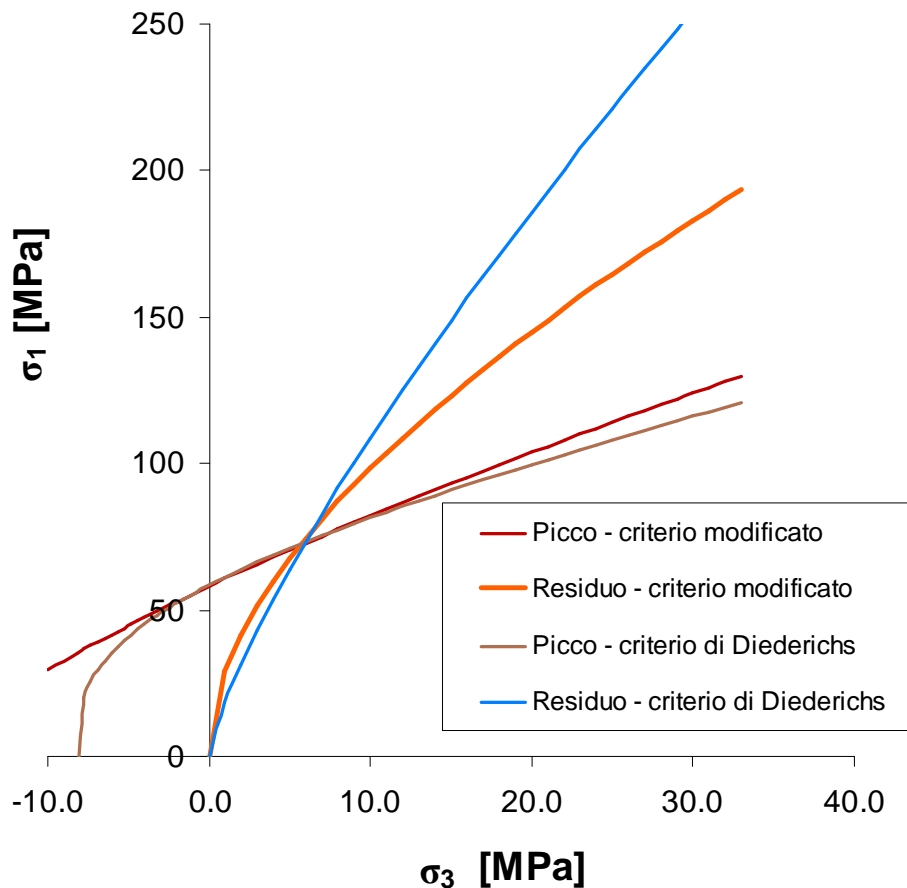


Figura 2: Criterio di Diederichs originario (2007) e modificato per il granito di Bressanone

I risultati ottenuti dal calcolo (fig. 3) mostrano le aree fratturate per *spalling* in calotta e arco rovescio: la loro profondità massima è pari a circa 1 m; la presenza dello scudo frontale genera una locale riduzione delle aree fratturate, mentre il rivestimento non ha questo effetto, essendo applicato a distanza troppo grande dal fronte di scavo.

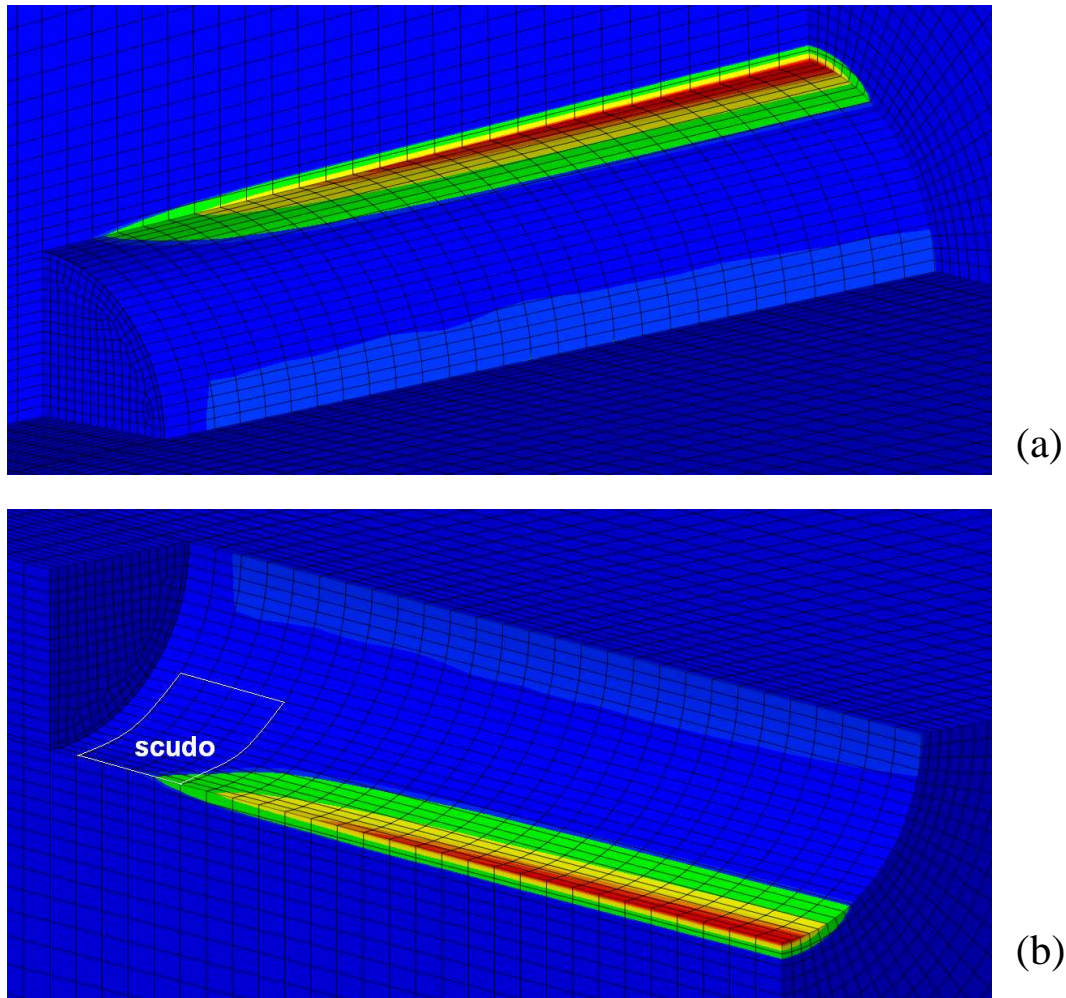


Figura 3: Rappresentazione delle zone fratturate per spalling lungo lo scavo in calotta (a) ed arco rovescio (b)

Applicazione del modello nel caso di ammasso roccioso con comportamento spingente

Come esempio di ammasso roccioso con comportamento spingente si considera una delle due canne della futura Galleria di Base della Torino-Lione nel tratto che segue l'intersezione con la discenderia di Saint Martin La Porte verso Modane, completata nel 2010 (Barla et al., 2010b), dove la presenza di scisti carboniferi ha provocato fenomeni fortemente spingenti. Si è adottata una legge costitutiva elastica-idealmente plastica con criterio di Mohr-Coulomb e parametri: E (modulo di deformazione)=2.0 GPa; ν (coefficiente di Poisson)=0.25; c (coesione) =2.0 MPa; φ (angolo di attrito)=24°; ψ (angolo di dilatanza)=4°. Si considera lo scavo ad una copertura di 1050 m; lo stato tensionale è assunto isotropo e pari a 26 MPa.

I risultati ottenuti con il calcolo sono mostrati in fig. 4 in termini di andamento del contorno deformato e di pressione che si sviluppa sia sugli scudi, quando questi sono a contatto con l'ammasso roccioso e fungono dunque da sostegno, che sul rivestimento. Integrando la pressione p_i sulla superficie degli scudi A_i e moltiplicandola per il coefficiente d'attrito, è stato possibile valutare la forza di spinta necessaria per vincere l'attrito sulle pareti (54.9 MN) e, sommando a questa la spinta alla testa, verificare che la spinta ausiliaria di progetto è sufficiente per evitare il blocco dello scudo.

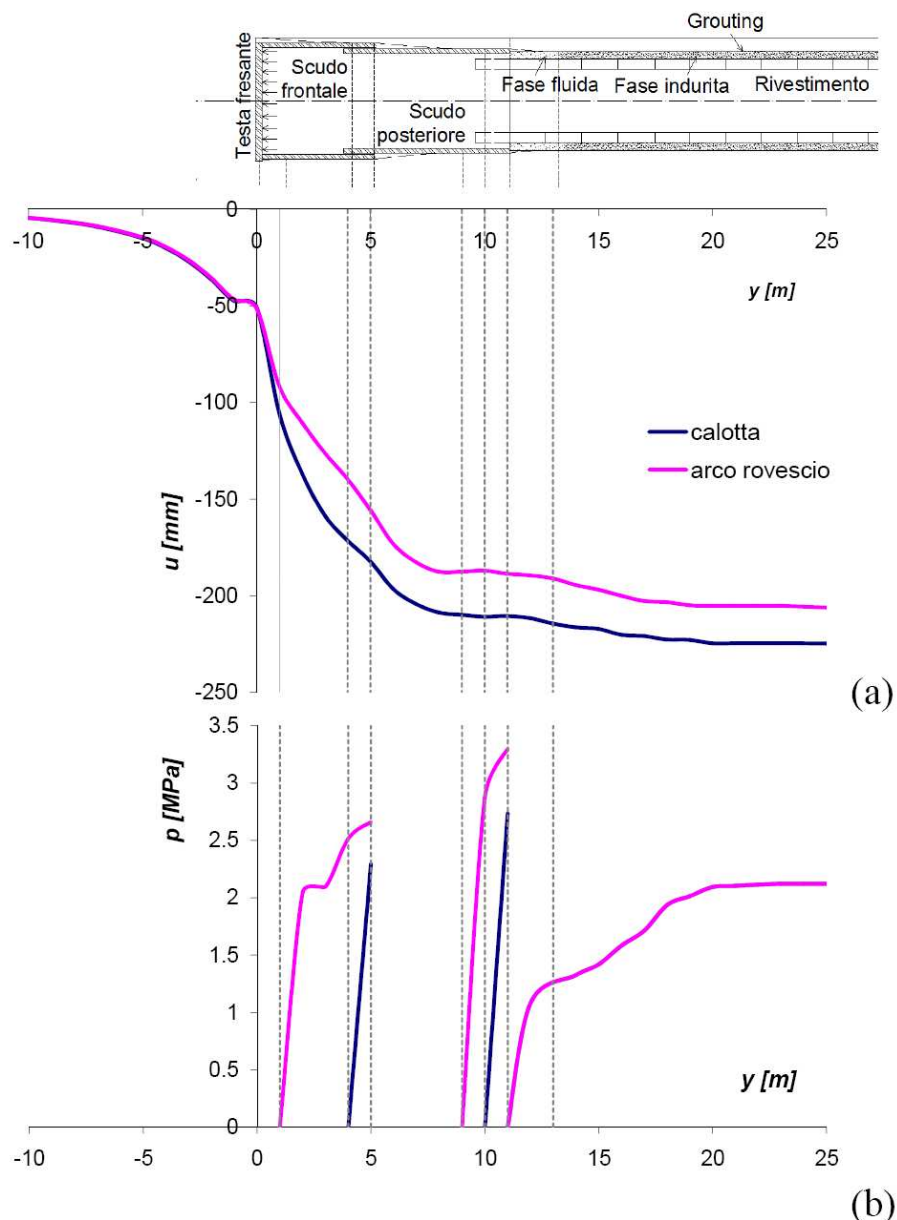


Figura 4: risultati in calotta ed arco rovescio: (a) Andamento del contorno deformato; (b) pressione di contatto che si sviluppa sugli scudi e sul rivestimento.

Bibliografia

- Barla G., Ceriani S., Fasanella M., Lombardi A., Malucelli G., Martinotti G., Oliva F., Perello P., Pizzarotti E.M., Polazzo F., Rabagliati U., Skuk S., Zurlo R. (2010) Problemi di stabilità al fronte durante lo scavo del cunicolo esplorativo Aica-Mules della Galleria di Base del Brennero. MIR 2010, Torino.
- Barla G., Bonini M., Debernardi D. (2010b) Time dependent deformations in squeezing tunnels. Int Journ Geoen Case Hist, <http://casehistories.geoengineer.org>, Vol.2, Issue 1, p.40-65.
- Diederichs M. S. (2007) The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunneling, Can Geot J, 44, 1082-1116.
- Diederichs M.S., Martin C.D. (2010) Measurements of spalling parameters from laboratory testing. Rock mechanics in civil and environmental engineering – Zhao, Labiouse, Dudt and Mathier (eds). Taylor & Francis Group, London
- Grandori R., Romualdi P. (2006) Galleria di Abdalajis (Malaga- Spagna). La sfida della nuova TBM Universale a Doppio Scudo. Strade e Autostrade n° 55