

EFFETTI DELL'INTRODUZIONE DI ELEMENTI ELASTO-PLASTICI NEL RIVESTIMENTO PRELIMINARE DI UNA GALLERIA PROFONDA IN CONDIZIONI SPINGENTI

Lorenzo Batocchioni (lorenzo.batocchioni@uniroma1.it)

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza"

Salvatore Miliziano (salvatore.miliziano@uniroma1.it)

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza"

Valeria Gonzalez (gonzalezrodriguez.1836333@studenti.uniroma1.it)

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza"

ABSTRACT. Quando una galleria profonda viene scavata in terreni scadenti per la progettazione del rivestimento provvisorio risulta spesso vantaggioso seguire il cosiddetto *yielding principle*. Realizzare cioè un rivestimento nel quale possano verificarsi deformazioni circonferenziali per l'inserimento di elementi elasto-plastici capaci di consentire lo sviluppo di convergenze limitando lo stato di sforzo a valori compatibili con la capacità portante. L'interazione con il terreno avviene con modalità differenti rispetto al classico rivestimento omogeneo e non risulta più quindi possibile valutare correttamente i carichi agenti su questo con metodi semplificati. In condizioni di cavo circolare e di stato tensionale iniziale isotropo, adottando un semplice legame costitutivo dell'ammasso di tipo elasto-plastico perfetto privo di dilatanza, in questo lavoro sono illustrati i risultati di analisi numeriche 2D di interazione terreno-struttura con lo scopo di evidenziare le modifiche cinematiche e tensionali che l'introduzione degli elementi elasto-plastici comporta rispetto al caso di rivestimento omogeneo.

1. INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi la nostra società ha bisogno di collegamenti tra le grandi città sempre più performanti. Per raggiungere questo obiettivo si progettano gallerie profonde che presentano sfide sempre maggiori. Non solo per motivazioni ambientali, ma anche per limitare curve e grandi pendenze del tracciato che ne limitano l'efficienza. Solo in Italia i tre principali cantieri di gallerie, COCIV, TELT e BBT, costano più di 15 mld €.

Quando gallerie profonde affrontano terreni scadenti si verificano le cosiddette condizioni spingenti "squeezing conditions", che portano a grandi rischi per la realizzazione dell'opera, tempi lunghi e alti costi (Hoek, 2011). Quando, nello scavo in tradizionale, si affrontano *squeezing conditions* si possono sperimentare convergenze decisamente importanti e sovraccarichi sul rivestimento preliminare. La maniera più efficace per affrontare queste situazioni sfavorevoli è progettare il rivestimento preliminare seguendo lo "yielding principle" (Kovári, 1998). In opposizione al "resistance principle", dove si progetta un rivestimento rigido con una capacità portante in grado di resistere al carico agente su di esso limitando le convergenze; nello *yielding principle* il rivestimento deve essere in grado di deformarsi, assecondando le deformazioni del terreno e riducendo così drasticamente lo stato tensionale a cui è sottoposto il sostegno. Un siffatto rivestimento deformabile è ottenuto inserendo nel classico rivestimento preliminare, composto solitamente da centine di acciaio e un guscio di calcestruzzo, degli elementi elasto-plastici (EPE) che hanno il compito di permettere lo sviluppo di convergenze al raggiungimento di un prestabilito livello di carico. Gli EPE possono essere a deformazione radiale o circonferenziale. I primi corrispondono alla realizzazione di uno strato deformabile tra l'estradosso del rivestimento rigido e la superficie di scavo. Nel secondo caso il rivestimento si deforma con il terreno e quindi la circonferenza del cavo si riduce. Questo è possibile attraverso lo scorrimento relativo tra diverse parti di rivestimento (centine scorrevoli) o la plasticizzazione di elementi sacrificali (LSC o HiDCon). In questi casi il carico assiale nel rivestimento è controllato rispettivamente dalla resistenza attritiva degli elementi scorrevoli o dal carico di snervamento degli elementi deformabili.

In letteratura sono presenti pochi contributi trattanti la progettazione di rivestimenti deformabili di gallerie profonde in *squeezing conditions*. Radončić et al. (2009) e Moritz (2011) confrontano il comportamento di differenti elementi deformabili con l'obiettivo di studiarne la convergenza attesa in relazione alla distanza dal fronte. In particolare, gli Autori adattano il Metodo Convergenza-Confinamento (CCM) ai rivestimenti deformabili. Similmente, Wu et al. (2022) propongono uno studio dettagliato degli elementi deformabili in calcestruzzo e propongono una forma analitica per la Curva Caratteristica del Supporto. Inoltre, Yang et al. (2022) studiano in dettaglio il danneggiamento del calcestruzzo e propongono un modello numerico in grado di simulare i rivestimenti deformabili con EPE in calcestruzzo.

Allo stato attuale, in letteratura non sono presenti specifici studi che investigano l'interazione terreno-struttura (SSI) dei rivestimenti deformabili. L'introduzione degli EPE nel rivestimento preliminare porta a forti deformazioni concentrate nelle zone limitrofe agli elementi e questo modifica radicalmente sia la cinematica sia la distribuzione degli stati tensionali con i quali avviene l'interazione terreno-struttura rispetto a quanto avviene per i classici rivestimenti omogenei. L'obiettivo di questo lavoro e in più in generale della ricerca che si sta sviluppando presso il DISG di Sapienza, è di colmare questo gap di conoscenza. Dal punto di vista della metodologia, lo studio si basa su analisi numeriche, dato che la peculiare SSI non è più studiabile mediante metodi semplificati come il metodo Convergenza-Confinamento: in particolare, analisi 2D che simulano una sezione verticale di una galleria scavata in tradizionale. Sono state assunte delle condizioni semplificative riguardanti la geometria, i modelli costitutivi e lo stato di sforzo iniziale; concentrandosi invece sulla modellazione degli EPE e dell'interfaccia che mette in connessione il rivestimento e il terreno.

2. METODOLOGIA

In questo articolo sono state sviluppate delle analisi numeriche 2D che simulano un rivestimento preliminare progettato secondo lo *yielding principle*, con l'obiettivo di studiare in dettaglio la peculiare SSI.

Le analisi sono state sviluppate sul codice alle differenze finite FLAC. Il modello rappresenta un quarto della galleria grazie alle simmetrie presenti. La mesh è composta da 4876 elementi, ai bordi esterni più lontani dalla galleria sono stati applicati dei vincoli tensionali; mentre condizioni al contorno cinematiche, annullando gli spostamenti normali, sono stati imposte sui due bordi della mesh con direzione radiale alla galleria (Figura 1). Lo stato di sforzo è assunto isotropo. Il terreno è simulato con i parametri tipici di un ammasso roccioso, inoltre il comportamento è stato ipotizzato isotropo ed elastico perfettamente plastico (Tabella 1). Data la profondità della galleria e le scarse caratteristiche del terreno, la risultante severità dello stato di sforzo è molto alta (*squeezing conditions*). Lo scavo è stato simulato con il metodo del rilassamento, assumendo un fattore di rilassamento all'istallazione del rivestimento del 70%. Il rivestimento provvisorio è stato modellato assumendo che sia composto da una centina circolare in acciaio HEB 240 per metro. Per semplicità è stato ipotizzato che il calcestruzzo abbia l'unico obiettivo di trasferire i carichi del terreno alle centine, che risultano quindi l'unico elemento portante. Per questo motivo la presenza del calcestruzzo è stata trascurata. Il rivestimento è stato modellato con degli elementi beam continui elastici perfettamente plastici, con valori del Modulo di Young (E) e del carico di snervamento a compressione (S_y) maggiori nelle centine e minori negli EPE. Inoltre, per simulare il comportamento degli EPE, assimilabili a cerniere plastiche, è stato assegnato agli elementi beam un momento plastico nullo. Infine, il rivestimento interagisce con il terreno attraverso un'interfaccia caratterizzata da una resistenza a compressione infinitamente grande e da una resistenza a taglio finita.

L'accuratezza dei risultati numerici è garantita da una relativamente alta densità di mesh, dall'estensione della mesh e da criteri di convergenza spinti (*sratio*). In particolare, la mesh è estesa 20 volte il raggio e l'*sratio* è $1e-05$. L'accuratezza dei risultati, con riferimento alle grandezze maggiormente significative del problema di interazione, è stata verificata analizzando i risultati di uno specifico studio parametrico.

Tabella 1. Parametri utilizzati nelle analisi numeriche

	Terreno	Centine acciaio	Elementi HiDSte	Interfaccia
Modulo di Young, E (MPa)	1000	210000	177	
Area del beam element, a (m ²)		106	106	
Momento di inerzia, I (cm ⁴)		11.26	11.26	
Carico di snervamento, S_y (MPa)		275	138	
Momento di plasticizzazione, M_y (Mpa*m)		-	0	
Angolo d'attrito, ϕ (°)	30			20
Coesione, c (kPa)	100			60
Dilatanza, ψ (°)	0			
Raggio della galleria, r (m)	5			
Stato di sforzo, S (kPa)	6750			
Coeff. di spinta a riposo, K_0 (-)	1			

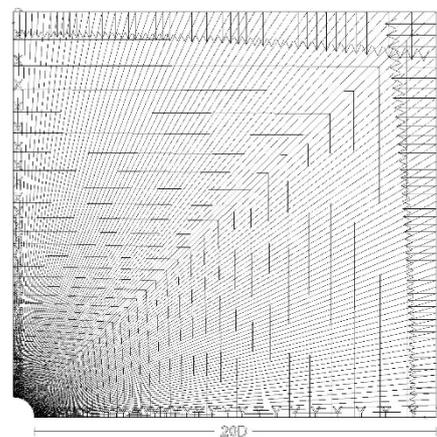


Figura 1. Griglia numerica

3. RISULTATI

Come ormai è ben noto, l'inserimento degli EPE nel rivestimento preliminare di una galleria profonda in condizioni difficili ha l'effetto benefico di ridurre l'entità del carico agente sul cavo. Questo al prezzo di una superficie di scavo maggiore per le convergenze aggiuntive. La progettazione di un rivestimento secondo lo *yielding principle*, in condizioni particolarmente severe, può risultare l'unica vera soluzione per gestire stati tensionali in-situ che possono raggiungere anche centinaia di MPa.

Dal punto di vista cinematico, il rivestimento rigido continuo tende a contrarre omoteticamente, in accordo con il terreno circostante (Figura 2a). Di contro, in conseguenza alle contrazioni circonferenziali concentrate in corrispondenza degli EPE, il rivestimento metallico tra due EPE tende a muoversi come un corpo rigido in direzione radiale (Figura 2b). Il terreno tuttavia tende a contrarre radialmente e, per questo motivo, l'interazione terreno-struttura assume caratteri peculiari, con tre conseguenze principali. In primo luogo, lo sforzo normale all'interfaccia (σ_n) tende a concentrarsi in corrispondenza delle estremità dei rivestimenti rigidi, come una sorta di effetto arco (Figura 2c). In secondo luogo, la σ_n media trasmessa dal terreno al rivestimento è decisamente inferiore. Infine, se l'interfaccia non è perfettamente liscia, come in questo caso, lo spostamento relativo tra terreno e rivestimento fa sì che nascano degli sforzi di taglio non trascurabili (τ , Figura 2d).

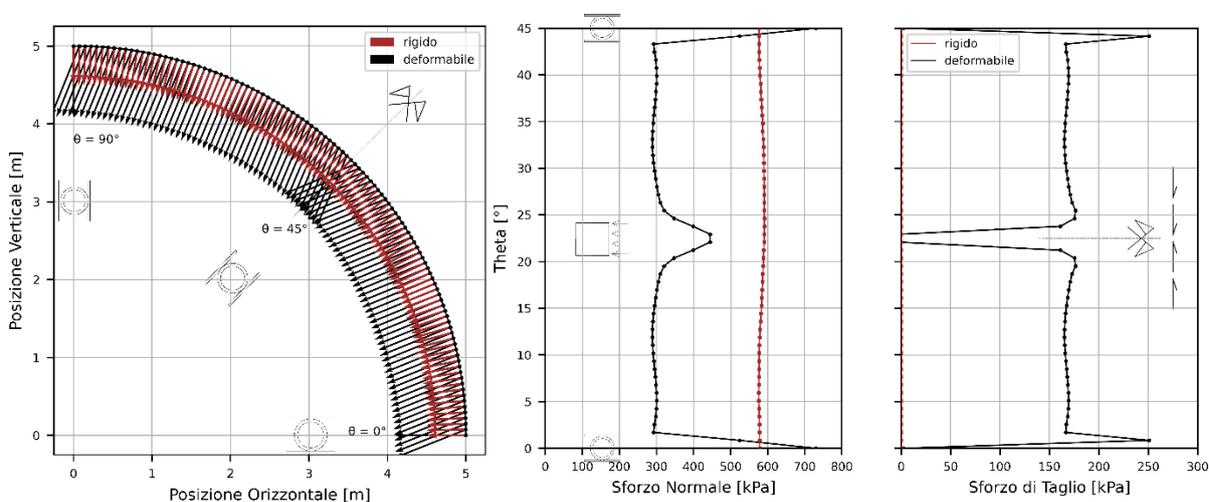


Figura 2. Vettori spostamento del rivestimento: rigido (a), deformabile (b) e variabili dell'interfaccia: sforzo normale (c), sforzo di taglio (d)

Come conseguenza della distribuzione di tensioni di contatto, si verifica una drastica riduzione della forza assiale (N, Figura 3a) e, allo stesso tempo, l'insorgere di sforzi di taglio e momenti flettenti non trascurabili (T e M, Figura 3b e 3c). In particolare, con un rivestimento deformabile, negli elementi rigidi compresi tra gli EPE, la N si riduce nettamente in quanto è limitata dal valore del S_y degli EPE, e tende ad aumentare man mano che si allontana dalle discontinuità del rivestimento a causa delle τ che nascono all'interfaccia. M e T nascono invece a causa dei picchi delle σ_n . Un'ulteriore concentrazione di σ_n si osserva nell'intorno di $\theta = 22.5^\circ$, nella zona più lontana dagli EPE dove le tensioni tangenziali tendono, per simmetria, ad annullarsi. Questa ulteriore concentrazione di σ_n , verosimilmente indotta dalle tau che si sviluppano lungo l'interfaccia terreno-struttura, ha un effetto di mitigazione di M e T.

In conclusione, la presenza degli EPE porta a deformazioni circonferenziali concentrate nei punti dove il rivestimento rigido si interrompe. Questo modifica radicalmente la classica SSI sia dal punto di vista cinematico sia statico, portando alla nascita di M e T importanti, e ciò comporta quindi l'impossibilità di utilizzare metodi semplificati come il CCM se non come approccio preliminare.

4. CONCLUSIONI

Nella progettazione del rivestimento provvisorio di una galleria scavata in tradizionale in *squeezing conditions*, a causa degli elevati carichi trasmessi dal terreno, in condizioni estreme può essere necessario ricorrere all'impiego di elementi a comportamento elasto-plastico. Questi consentono lo sviluppo delle convergenze necessarie a ridurre adeguatamente i carichi agenti sul rivestimento.

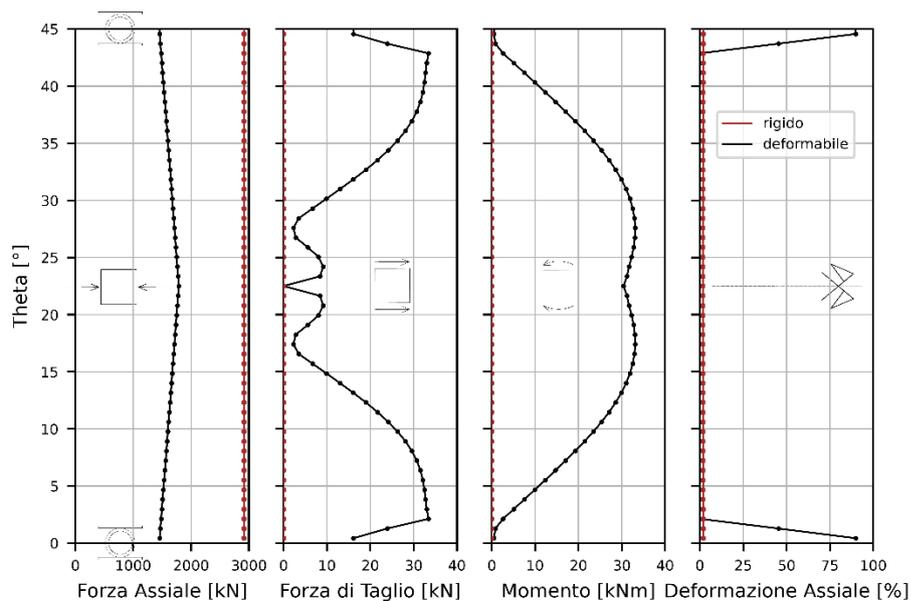


Figura 3. Variabili degli elementi strutturali: forza assiale (a), forza di taglio (b), momento (c), compressione assiale (d).

In questo studio sono state eseguite delle specifiche analisi numeriche 2D al fine di studiare i meccanismi di interazione terreno-struttura quando degli elementi elasto-plastici sono inseriti nel rivestimento preliminare di una galleria. I principali risultati sono così riassumibili:

- L’inserimento degli elementi elasto-plastici porta ad un aumento delle convergenze con un’importante riduzione del carico normale all’interfaccia.
- La cinematica cambia completamente: la chiusura degli elementi elasto-plastici comporta delle deformazioni circonferenziali, che sono accoppiate a movimenti rigidi del rivestimento metallico tra due elementi deformabili verso l’interno del cavo con convergenze che non sono più solo radiali.
- Come conseguenza di questo specifico cinematisimo si sviluppa una differente interazione terreno-struttura. Con la formazione di concentrazioni di carico normale all’interfaccia in corrispondenza delle parti finali delle centine (vicino agli elementi deformabili) che possono assumere valori particolarmente alti (picchi). Inoltre, se l’interfaccia mostra una resistenza al taglio, nascono anche degli importanti sforzi di taglio con andamenti simili a quelli dello sforzo normale.
- Conseguentemente avviene un’importante riduzione della forza assiale nel rivestimento al prezzo della nascita di tagli e momenti non trascurabili.
- Nella progettazione di questo tipo di rivestimenti, pertanto, non è più possibile impiegare il classico Metodo Convergenza-Confinamento. Al fine di stimare accuratamente le sollecitazioni agenti sul rivestimento, l’interazione terreno-struttura deve necessariamente essere studiata con l’ausilio delle analisi numeriche.

I risultati ottenuti da questo primo lavoro forniscono delle preliminari informazioni sull’interazione terreno-struttura di rivestimenti progettati secondo lo *yielding principle*. Queste sono utili a mettere in luce gli aspetti peculiari dei fenomeni di interazione sotto l’aspetto sia cinematico che statico. Futuri sviluppi sono necessari per approfondire condizioni più realistiche riguardanti la modellazione costitutiva, la geometria del rivestimento, il ruolo del calcestruzzo e l’anisotropia dello stato di sforzo.

5. BIBLIOGRAFIA

- Hoek, E. (2001). Big tunnels in bad rock. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Kovári, K. (1998). Tunneling in squeezing rock. *Tunnel 5/98*.
- Moritz, B. (2011). Yielding elements—requirements, overview and comparison. *Geomechanics and Tunnelling*.
- Radončić, N., Schubert, W., & Moritz, B. (2009). Ductile support design. *Geomechanics and Tunnelling*.
- Wu, K., Shao, Z., Sharifzadeh, M., Hong, S., & Qin, S. (2022). Analytical computation of support characteristic curve for circumferential yielding lining in tunnel design. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Yang, K., Yan, Q., Shi, Z., Zhang, C., & Ma, S. (2022). Numerical Study on the Mechanical Behavior of Shotcrete Lining with Yielding Support in Large Deformation Tunnel. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.