

L'EFFETTO ATTRITIVO DELL'INTERFACCIA NELL'INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA DI UNA GALLERIA CON RIVESTIMENTO DEFORMABILE

Lorenzo Batocchioni (lorenzo.batocchioni@uniroma1.it)
Università di Roma "La Sapienza"

Valeria González (gonzalezrodriguez.1836333@studenti.uniroma1.it)
Università di Roma "La Sapienza"

Salvatore Miliziano (salvatore.miliziano@uniroma1.it)
Università di Roma "La Sapienza"

ABSTRACT. Quando gallerie profonde attraversano terreni di scadenti caratteristiche meccaniche, avvengono *squeezing conditions* e il rivestimento deve essere progettato secondo il *yielding principle*. A tal scopo possono essere usati speciali elementi elasto-plastici inseriti nel rivestimento preliminare. La presenza degli elementi elasto-plastici modifica radicalmente l'interazione terreno-struttura rendendo necessario l'utilizzo di analisi numeriche. In questo paper è stato sviluppato il modello 2D di una sezione verticale di una galleria circolare con il rivestimento preliminare progettato secondo il *yielding principle*, con lo scopo di studiarne la specifica interazione terreno struttura. Attraverso uno studio parametrico, particolare attenzione si è posta al comportamento meccanico dell'interfaccia tra rivestimento della galleria e terreno. Infatti questa ha un ruolo chiave, regolando l'interazione e assumendo caratteristiche di resistenza molto variabili soprattutto nello scavo in tradizionale.

1. INTRODUZIONE

Quando si ha a che fare con gallerie profonde in terreni scendenti si hanno le cosiddette *squeezing conditions*. Tali scenari estremi nelle gallerie spesso portano a dure ripercussioni sul progetto dal punto di vista di tempi e costi. Inoltre, nello scavo in tradizionale, maggiormente adottato in tali condizioni estreme, ci si aspetta convergenze estremamente elevate e possibili sovraccarichi del rivestimento. Il miglior modo per affrontare queste condizioni è progettare il rivestimento secondo lo *yielding principle* (Kovári, 1998): il rivestimento deve essere flessibile, permettendo al terreno di deformarsi e, così facendo, andando a ridurre il carico agente sul rivestimento stesso. Tutto questo senza però perdere la sua capacità portante, necessaria a sostenere il cavo. Ci sono varie soluzioni tecnologiche per introdurre deformazioni locali all'interno del rivestimento preliminare (Moritz, 2011; Wu et al., 2021). Queste possono essere circonferenziali o radiali. Le prime, le più utilizzate soprattutto nello scavo in tradizionale, saranno oggetto di questo paper. Centine scorrevoli (TH), hiDCon, LSC, hiDSte e i Wabe sono i più comuni elementi elasto-plastici (EPE) utilizzati in gallerie profonde in *squeezing conditions*. In opposizione al *yielding principle* vi è il tradizionale *resistance principle*, dove il rivestimento è progettato per avere una capacità portante adatta al carico proveniente del terreno, qualsiasi esso sia.

Come dimostrato in Batocchioni et al. (2023) le analisi numeriche sono necessarie per un corretto studio di una galleria progettata secondo il *yielding principle*. Tuttavia esiste una limitata letteratura a riguardo (Barla et al., 2011; Radončić, 2011; Tian et al., 2018; Yang et al., 2022). Infatti, l'interazione terreno-struttura (SSI) di una galleria con rivestimento deformabile non è stata granché studiata, lasciando un importante gap nella comprensione del comportamento di gallerie con questo tipo di rivestimento. Nella meccanica di SSI di una galleria con rivestimento deformabile l'interfaccia svolge un ruolo fondamentale, dati gli importanti spostamenti relativi tra rivestimento e terreno che li avvengono a causa delle deformazioni puntuali circonferenziali nell'elemento strutturale. Com'è ben noto l'interfaccia assume comportamenti intermedi, e difficilmente stimabili con esattezza, tra l'ipotesi di perfetta aderenza e scorrimento libero; soprattutto quando si scava in tradizionale dove l'interfaccia è divisa in calcestruzzo-terreno e acciaio-terreno. Perciò in questo paper è stata realizzata una serie di analisi numeriche parametriche al variare dell'attrito dell'interfaccia.

2. METODOLOGIA

In questo paper è stato sviluppato un modello numerico 2D che simula una sezione verticale di una galleria circolare (5m di raggio) supportata da un rivestimento preliminare deformabile sottostante ad uno stato tensionale

in-situ isotropo. Il modello ha l'obiettivo di studiare la peculiare *SSI* al variare dell'attrito dell'interfaccia, considerato che questo parametro è intrinsecamente molto variabile e di difficile valutazione. La metodologia è in linea con Batocchioni et al. (2023), ma con un'attenzione maggiore sul ruolo dell'interfaccia e sulla sua modellazione. I risultati poi, al variare dell'angolo d'attrito dell'interfaccia (φ), sono stati rappresentati nel dominio di interazione NM in relazione allo stato limite ultimo (*USL*) dell'elemento strutturale.

Le analisi sono state realizzate con il codice FDM FLAC2D (Itasca, 2011). Il modello simula solamente un quarto della galleria grazie alle simmetrie presenti nel sistema (Figura 1). La mesh è composta da 4876 elementi. Le condizioni al contorno sono quelle rappresentate in Figura 1,a.

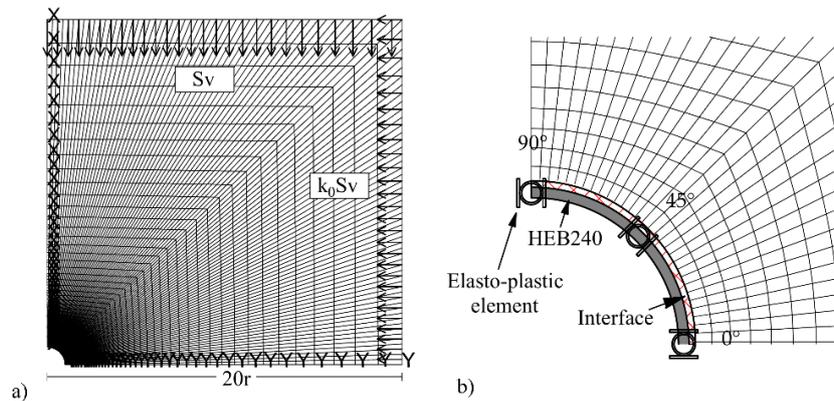


Figura 1. a) Mesh numerica su FLAC2D; b) zoom sulla galleria e sull'interfaccia terreno-struttura.

Tutti i parametri dell'analisi sono stati scelti per essere rappresentativi di una galleria profonda in *squeezing conditions*. Più nello specifico il comportamento meccanico del terreno è stato modellato come isotropico elasto-plastico perfetto con i parametri riportati in Tabella 1. In queste analisi il comportamento reologico è stato trascurato. La severità dello stato di sforzo è piuttosto elevata, cioè il rapporto tra resistenza uniassiale e lo stato di sforzo in sito è estremamente basso (0.06), corrispondente a *squeezing conditions* (Ramoni & Anagnostou, 2010). Queste condizioni estreme sono causate da una galleria relativamente profonda ($z \approx 250m$) che attraversa un ammasso roccioso debole ($UCS = 350 kPa$). In queste condizioni un cavo di questo raggio non supportato sperimenterebbe convergenze dell'ordine del metro.

Lo scavo è stato simulato con il metodo del rilassamento, assumendo un rivestimento preliminare installato ad un valore tipico dello scavo in tradizionale in *squeezing conditions* ($\lambda = 0.7$). Il rivestimento è stato modellato con una centina HEB240 per metro con un *EPE* inserito ogni 45°. Per semplicità la presenza del calcestruzzo proiettato è stata trascurata. Con questa semplificazione è stato possibile utilizzare un modello 2D. Il rivestimento è stato modellato con un elemento *beam* elasto-plastico perfetto. Anche gli *EPE* sono stati così modellati, ma con valori del modulo di Young (E) e della forza normale di snervamento (f_y) molto minori. Gli *EPE* sono stati modellati per essere generici, ma come tipologia simile agli hiDSte (la soluzione migliore da inserire nelle centine, Batocchioni et al., 2023). Inoltre E è quello ottenuto da prove di compressione eseguite in laboratorio, mentre f_y è stata impostata come metà di quella delle centine. Su quest'ultimo aspetto interessanti riflessioni sono state fatte da Tian et al. (2018) e Yang et al. (2022). Nella meccanica di interazione di un rivestimento progettato secondo il *yielding principle*, gli *EPE* si comportano come delle cerniere plastiche, è stato assunto quindi un valore nullo per il momento di snervamento del *beam*. Questa è una ragionevole semplificazione, considerando la loro capacità di resistere a momento flettente trascurabile rispetto alle centine. Inoltre, per simulare le deformazioni controllate di questo tipo di rivestimento, una speciale routine FISH è stata scritta in FLAC. Questa routine rende gli *EPE* estremamente rigidi una volta raggiunta il 97% della loro massima deformazione (che nel caso degli hiDSte ad esempio coincide con il diametro interno del tubo). Il rivestimento è connesso al terreno attraverso un'interfaccia caratterizzata da resistenza a compressione infinita (elastica) e da un comportamento a taglio elasto-plastico perfetto alla Mohr (Tian et al. 2016). In particolare, in linea con quanto scelto in letteratura, il criterio di resistenza è ipotizzato puramente attritivo con φ variabile tra 0° (scorrimento libero) e 45° (perfetta aderenza). Radončić (2011) attraverso esperimenti in-situ ha ottenuto φ calcestruzzo-roccia variabili nel range 20° – 30°.

Infine l'accuratezza delle analisi numeriche è garantita da densità e dimensione della mesh relativamente alte e da criteri di convergenza stringenti ($s_{ratio} = 10^{-5}$). Ulteriori verifiche sono state realizzate controllando che le variabili più importanti raggiungessero condizioni stazionarie con l'avanzamento degli step di calcolo. In aggiunta, dove possibile, il senso dei risultati è stato validato con il metodo convergenza-confinamento (*CCM*) come riferimento analitico (Wu et al., 2022; Batocchioni et al., 2023).

Tabella 1. Parametri usati nelle analisi numeriche.

	Terreno	Centine	EPE	Interfaccia
Angolo d'attrito (°)	30			0 to 45
Coesione (kPa)	100			0
Rigidezza normale e di taglio (kPa)				4.7e7
Modulo di Young (kPa)	1e6	2.1e8	1.8e5	
Forza normale di snervamento (kN)		2915	1458	
Momento di snervamento (kNm)			0	

3. RISULTATI

L'inserimento degli *EPE* nel rivestimento preliminare di gallerie in *squeezing conditions* riduce i carichi agenti sugli elementi strutturali. In casi particolarmente estremi seguire il *yielding principle* può essere l'unica soluzione efficace per gestire severità dello stato di sforzo che possono raggiungere diverse MPa (6.75 nelle analisi). È ormai noto in letteratura come l'inserimento degli *EPE*, permettendo maggiori convergenze, diminuisce nettamente lo sforzo normale (N) nel rivestimento a costo di un momento flettente (M) non trascurabile e non valutabile con metodi analitici semplificati come il *CCM* (Barla et al., 2011; Tian et al., 2016, 2018; Batocchioni et al., 2023) Vedere Figura 2, risultati “rigido” e deformabile” a confronto. Questo lavoro poi si concentra sull'effetto della resistenza a taglio dell'interfaccia. In particolare, se l'interfaccia non è perfettamente liscia: **1)** lo scorrimento relativo porta a importanti tensioni di taglio (τ) nulle per simmetria in mezzzeria ($\vartheta = 45^\circ$), dove **2)** la tensione normale (σ_n) tende ad aumentare con lo scorrimento relativo che diminuisce (Figura 2a). Di conseguenza, sugli elementi strutturali: **3)** le τ portano ad un aumento di N sempre in mezzzeria (Radončić, 2011; Tian et al., 2018), dove **4)** il picco centrale di σ_n ha un effetto benefico sull'andamento di M andando a ridurlo (Figura 2b).

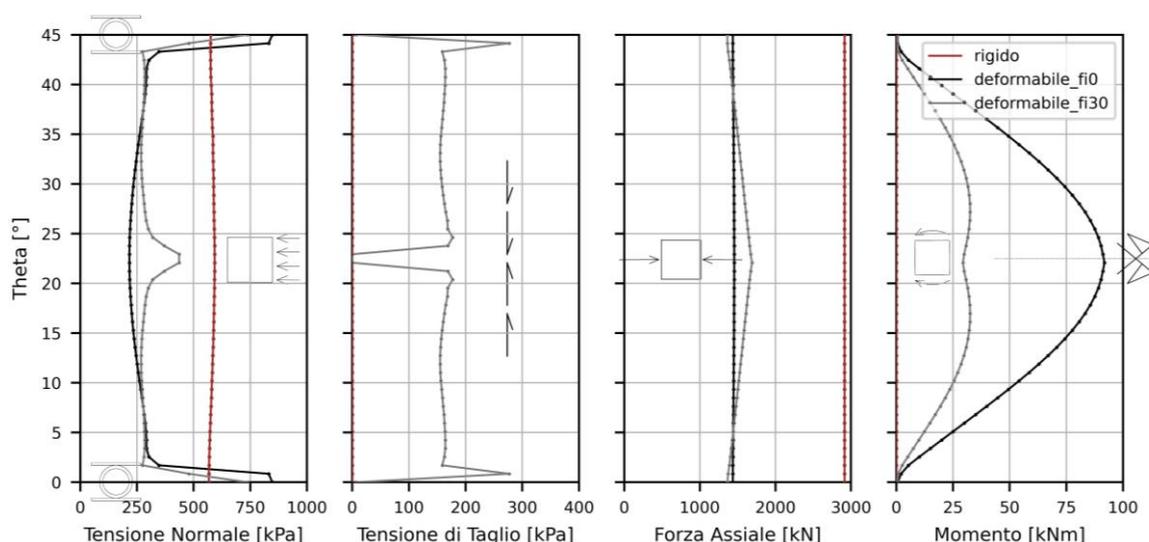


Figura 2. a) variabili d'interfaccia: tensione normale (σ_n) e di taglio (τ); b) variabili strutturali: sforzo normale (N) e momento flettente (M).

In linea con le precedenti assunzioni, cioè all'aumentare della resistenza a taglio dell'interfaccia N aumenta e M diminuisce, gli autori trovano molto interessante e utile rappresentare questo andamento della coppia di valori (N , M) della sezione più critica (mezzzeria) al variare di φ dell'interfaccia in relazione all'*USL* della centina HEB240 dove sono inseriti (Figura 3). Il grafico mostra chiaramente che le coppie (N , M) si allineano su una retta con gradiente maggiore dell'*USL* della centina. Questo vuol dire che all'aumentare di φ la severità dei carichi agenti sul rivestimento diminuisce (effetto benefico sulla struttura). Inoltre, le analisi parametriche hanno mostrato che all'aumentare di φ la chiusura degli *EPE* diminuisce, aumentandone in un certo senso il range di azione plastico.

In sintesi si può affermare che l'interfaccia tra terreno e rivestimento, quando non perfettamente liscia, può essere vista come un elemento dissipativo che aiuta il sistema terreno-rivestimento a sopportare carichi elevati.

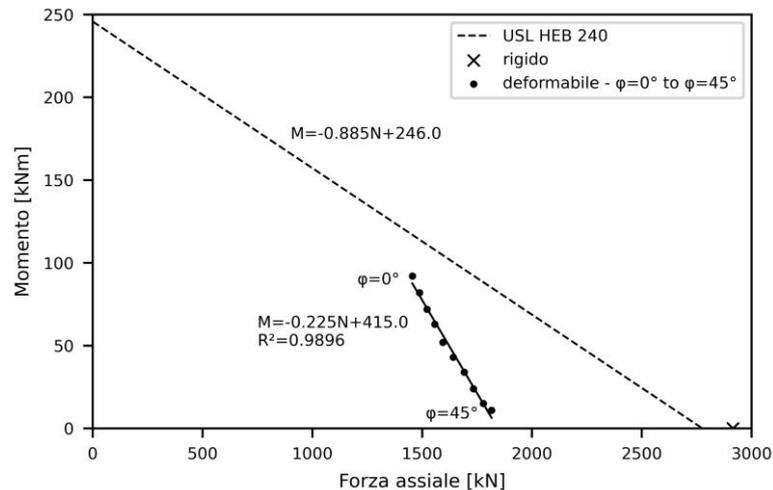


Figura 3. Diagramma di interazione NM: coppie (N, M) della sezione in mezzeria al variare dell'angolo d'attrito (φ) dell'interfaccia in relazione allo stato limite ultimo (USL) della centina.

4. CONCLUSIONI

In squeezing conditions la progettazione di rivestimenti preliminari secondo lo yielding principle stravolge completamente l'interazione terreno-struttura. Attraverso delle analisi numeriche si è potuto studiarne la peculiare meccanica. Particolare attenzione è stata posta sull'interfaccia, cuore dell'interazione. E' infatti grazie agli spostamenti relativi all'interfaccia che possono avvenire delle deformazioni puntuali nel rivestimento. Un'analisi parametrica è stata realizzata facendo variare la resistenza a taglio dell'interfaccia terreno-struttura. Grazie a all'analisi si è compreso come la resistenza a taglio aumenti leggermente lo sforzo normale a vantaggio di un'importante riduzione del momento flettente e della chiusura degli elementi elasto-plastici stessi. Si è quindi compreso come l'interfaccia possa essere considerata come un elemento dissipativo che aiuta la galleria a sopportare carichi elevati.

Per quanto riguarda futuri sviluppi, la ricerca dovrebbe andare in direzione di: realizzazione di un modello 3D (unico modo per modellare realmente l'interazione di centine e calcestruzzo) e modellazione più realistica del terreno con modelli costitutivi più avanzati con ad esempio la dipendenza dal tempo.

5. BIBLIOGRAFIA

- Barla G., Bonini M., Semeraro M. (2011). Analysis of the behaviour of a yield-control support system in squeezing rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(1): 146-154.
- Batocchioni L., Gonzalez V. and Miliziano S. (2023). Soil-structure interaction of preliminary deformable lining for conventional tunnel in squeezing conditions using HiDSte elements. *Proc. 15th Int. ISRM Cong., Salzburg, Aus*: 135-140.
- Itasca Consulting Group (2011). *FLAC2D (Version 7.0). Manual*.
- Kovári K. (1998). Tunnelling in squeezing rock. *Tunnel*, 5: 12-31.
- Moritz B. (2011). Yielding elements-requirements, overview and comparison. *Geomechanics and Tunnelling*, 4:221-236.
- Radončić N. (2011). Tunnel design and prediction of system behaviour in weak ground. *PhD Thesis, TU Graz, Aus*.
- Ramoni M., Anagnostou G. (2010). Thrust force requirements for TBMs in squeezing ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4): 433-455.
- Tian H., Chen W.Z., Yang D.S., Wu G.J., Tan X. J. (2016). Numerical analysis on the interaction of shotcrete liner with rock for yielding supports. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 54: 20-28.
- Tian H., Chen W. Z., Tan X. J., Yang D. S., Wu G. J., Yu J. X. (2018). Numerical investigation of the influence of the yield stress of the yielding element on the behaviour of the shotcrete liner for yielding support. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73: 179-186.
- Wu K., Shao Z., Qin S., Wei W., Chu, Z (2021). A critical review on the performance of yielding supports in squeezing tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 115, 103815.
- 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*, 14(1): 144-152.
- 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*, 56(2): 1563-1584.