

Valutazione del carico a lungo termine sui rivestimenti di gallerie

Original

Valutazione del carico a lungo termine sui rivestimenti di gallerie / Lopez Ochoa, J., Campana, F., Insana, A., Barla, M.. - ELETTRONICO. - (2025), pp. 769-776. (XXVIII Convegno Nazionale di Geotecnica Venezia (Ita) 11-13 giugno 2025).

Availability:

This version is available at: 11583/3001027 since: 2025-06-17T11:21:56Z

Publisher:

PATRON EDITORE

Published

DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

Valutazione del carico a lungo termine sui rivestimenti di gallerie

J. Lopez Ochoa, F. Campana, A. Insana, M. Barla

Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

SOMMARIO: I rivestimenti delle gallerie realizzate con tecnica tradizionale sono generalmente composti da due livelli. Lo strato esterno, detto anche rivestimento di prima fase o primario, viene posto in opera immediatamente dopo lo scavo ed è concepito per garantire la necessaria stabilità, consentendo un parziale rilascio delle tensioni nell'ammasso roccioso. Lo strato interno, o rivestimento secondario, invece, viene solitamente applicato in una fase successiva ed è concepito per sopportare il carico dell'ammasso roccioso a lungo termine e, eventualmente, la pressione dell'acqua. L'attuale pratica progettuale per simulare il trasferimento di carico tra i due rivestimenti si basa su approcci semi-empirici, presupponendo che l'intero carico sopportato dal rivestimento di prima fase venga trasferito, alla fine della sua vita utile, direttamente al rivestimento secondario. Alcuni autori hanno dimostrato che in molti casi, anche dopo 30-40 anni, i rivestimenti di prima fase sono ancora efficienti e sul rivestimento finale agiscono carichi di entità limitata. L'articolo si propone di indagare i meccanismi di trasferimento del carico tra il rivestimento primario e quello secondario, considerando il diverso grado di deterioramento dello strato di calcestruzzo proiettato e delle centine. Una serie di analisi numeriche agli elementi finiti è utilizzata per studiare, in maniera parametrica, il processo di deterioramento e individuare scelte progettuali meno conservative rispetto alla pratica tradizionale seppur affidabili.

1 INTRODUZIONE

L'interazione a lungo termine tra l'ammasso roccioso e i rivestimenti delle gallerie di prima fase e definitivi è un fenomeno che, nonostante la rilevanza, ha ricevuto ad oggi un'attenzione tutto sommato limitata. Tuttavia, questo aspetto risulta cruciale per la stabilità e il mantenimento dell'integrità strutturale delle gallerie durante il loro ciclo di vita, poiché il trasferimento progressivo dei carichi dal sostegno di prima fase dello scavo al rivestimento definitivo può influire negativamente sulle prestazioni complessive della struttura. In riferimento alla pratica dello scavo in tradizionale, i sostegni di prima fase sono composti nella maggior parte dei casi, in relazione alla qualità dell'ammasso, da supporti combinati di chiodature, centine metalliche e calcestruzzo proiettato.

Ai fini della valutazione dei carichi a lungo termine sui rivestimenti definitivi, gli approcci seguiti nella fase progettuale di una galleria spesso assumono una completa degradazione del sostegno provvisorio, nonostante studi dimostrano che tale degrado è molto spesso assai inferiore al previsto (Trunda & Hilar, 2020). Inoltre, è stato dimostrato come i supporti di prima fase in calcestruzzo proiettato possono mantenere la loro funzionalità per oltre 30 anni (Galler & Lorenz, 2018). Queste evidenze confermano l'interesse di approfondire il ruolo effettivo del rivestimento di prima fase nella stabilità a lungo termine delle gallerie.

Per tenere conto di questi aspetti, le analisi tenso-deformative di lungo termine dei rivestimenti definitivi delle gallerie dovrebbero considerare due fenomeni principali: la degradazione del rivestimento di prima fase nel tempo e il deterioramento dell'ammasso roccioso circostante.

Per quanto riguarda l'ammasso roccioso, il fenomeno consiste nella progressiva riduzione delle proprietà meccaniche della roccia nel tempo dovuta a diversi fattori, tra cui i comportamenti dipendenti dal tempo, l'erosione dell'ammasso circostante per effetto dell'acqua e la propagazione di fratture esistenti associate alle attività di scavo. Showkati et al. (2021), Huisman et al. (2006), Shimamoto et al. (2009), Tating et al. (2013) e Colman (1981) hanno descritto la riduzione delle proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso in funzione del tempo tramite relazioni empiriche di tipo logaritmico per simulare gli effetti del degrado nel lungo termine. In particolare, Showkati et al. (2021) hanno suggerito che i parametri di resistenza e deformabilità possono diminuire rispettivamente fino al 30% e 40% in 100 anni di vita utile della galleria, proponendo le seguenti equazioni di riduzione dei parametri:

$$\phi(t) = \phi_o [1 - 0.15 \log(t + 1)] \quad 0 \leq t \leq 100 \quad (1)$$

$$c(t) = c_o [1 - 0.15 \log(t + 1)] \quad 0 \leq t \leq 100 \quad (2)$$

$$E(t) = E_o [1 - 0.2 \log(t + 1)] \quad 0 \leq t \leq 100 \quad (3)$$

dove ϕ = angolo di resistenza al taglio; c = coesione; E = modulo di elasticità; ϕ_o = angolo di resistenza al taglio iniziale prima del degrado; c_o = coesione iniziale prima del degrado e E_o = modulo di elasticità iniziale prima del degrado.

Per quanto concerne invece la degradazione del rivestimento di prima fase, e in particolare del calcestruzzo proiettato, gli approcci descritti in letteratura si basano sulla riduzione della rigidità e della resistenza nel tempo. In riferimento agli studi di Neville & Brooks (1987), il modulo di elasticità iniziale del materiale composito calcestruzzo può essere espresso in funzione del modulo di elasticità degli inerti e della matrice cementizia secondo l'equazione (4). Si assume che la degradazione del calcestruzzo avvenga a seguito di un deterioramento della matrice cementizia più veloce rispetto a quello dell'inerte per effetto dell'umidità e delle infiltrazioni d'acqua nel calcestruzzo, con un conseguente aumento della porosità della matrice cementizia. I risultati della ricerca condotta da Helut & Danica (1966) mostrano una correlazione diretta tra la rigidità del calcestruzzo e la porosità della matrice cementizia: il calcestruzzo risulta infatti meno rigido all'aumentare della porosità della matrice. In relazione a quanto appena esposto, la degradazione del modulo di elasticità del calcestruzzo proiettato può essere valutata abbattendo gradualmente il valore iniziale del modulo elastico della matrice cementizia, assumibile da letteratura pari a 16 GPa, e ricalcolando il modulo elastico degradato del calcestruzzo con l'equazione (4).

$$E_c = \left[\frac{1-g}{E_m} + \frac{g}{E_p} \right]^{-1} \quad (4)$$

dove E_c = modulo di elasticità del materiale composito; E_p = modulo di elasticità dell'inerte; E_m = modulo di elasticità della matrice e g = volume percentuale della fase inerte che, per il calcestruzzo, può assumere un valore di 0.67.

Relativamente ai parametri meccanici di resistenza del calcestruzzo, quali la coesione e la tangente dell'angolo di resistenza al taglio in riferimento al criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, Ziller & Cont (2018) e Usman & Galler (2013) propongono una riduzione graduale dei parametri di resistenza al passo con la riduzione del modulo elastico. Inoltre, nella ricerca condotta da Shokwati et al. (2021) il tasso di deterioramento della resistenza del calcestruzzo proiettato segue un comportamento lineare che porta una riduzione fino all'80% del valore iniziale dopo 100 anni di vita. Per quanto riguarda gli elementi di supporto in acciaio quali le centine, è stato dimostrato che non si verificano riduzioni significative della resistenza nell'arco della vita utile delle gallerie (Galler & Lorenz, 2018).

Alla luce di quanto sopra, il lavoro proposto nel presente articolo si ispira a lavori precedentemente condotti e ha lo scopo di confrontare la metodologia proposta per la valutazione dei carichi nel lungo termine sui rivestimenti definitivi, la quale prevede una degradazione parziale nonché graduale nel tempo del rivestimento di prima fase e dell'ammasso roccioso, con quella tradizionalmente adottata che prevede una totale e immediata degradazione del sostegno di prima fase. L'approccio è proposto al fine di trovare una soluzione ottimizzata per la progettazione dei rivestimenti definitivi delle gallerie e per la stima attraverso la modellazione numerica del carico sul rivestimento ad un ben definito istante temporale della vita utile dell'opera.

2 SIMULAZIONE NUMERICA DEL FENOMENO DI DEGRADO

2.1 Metodologia e proprietà dei materiali

Lo studio è stato condotto mediante la realizzazione di 8 diversi modelli numerici considerando diversi scenari che includono la degradazione del rivestimento di prima fase al fine di valutarne l'influenza nel lungo termine sul rivestimento definitivo. Gli scenari si differenziano per la degradazione o meno dell'ammasso roccioso (oltre che del rivestimento di prima fase, la cui degradazione è sempre considerata), la qualità dell'ammasso roccioso (GSI) e la geometria della sezione trasversale della galleria. La Tabella 1 sintetizza i diversi scenari simulati nelle 8 analisi numeriche condotte.

Tabella 1. Combinazioni studiate con i modelli numerici.

Modello	Modello di degradazione		Qualità ammasso roccioso (GSI)		Arco rovescio	
	A.R.	R.P.F.	Media	Bassa	Si	No
1	X	X	X		X	
2	X	X	X			X
3	X	X		X	X	
4	X	X		X		X
5		X	X		X	
6		X	X			X
7		X		X	X	
8		X		X		X

A.R.: Modello di degradazione dell'ammasso roccioso proposto da Showkati et al. (2021)

R.P.F.: Modello di degradazione del rivestimento di prima fase proposto da Ziller & Cont (2018) e Usman & Galler (2013)

Per la realizzazione dei modelli numerici è stato utilizzato il metodo degli elementi finiti mediante il software RS2 (Rocscience, 2024). Dal punto di vista geometrico, sono state considerate due sezioni rappresentative comunemente adottate per gallerie scavate con metodo tradizionale. Entrambe le sezioni presentano una configurazione a ferro di cavallo differenziandosi per la presenza o meno dell'arco rovescio (medesima area di scavo pari a 133 m²). La discretizzazione dei modelli numerici è stata ottenuta mediante una mesh graduata, composta da elementi finiti a 3 nodi e aumentando la discretizzazione in prossimità del contorno di scavo della galleria e dei rivestimenti, al fine di consentire una buona risoluzione del comportamento tenso-deformativo durante le varie fasi. La Figura 1 riporta le dimensioni delle sezioni utilizzate per le analisi e una vista di dettaglio della mesh adottata nell'intorno della galleria.

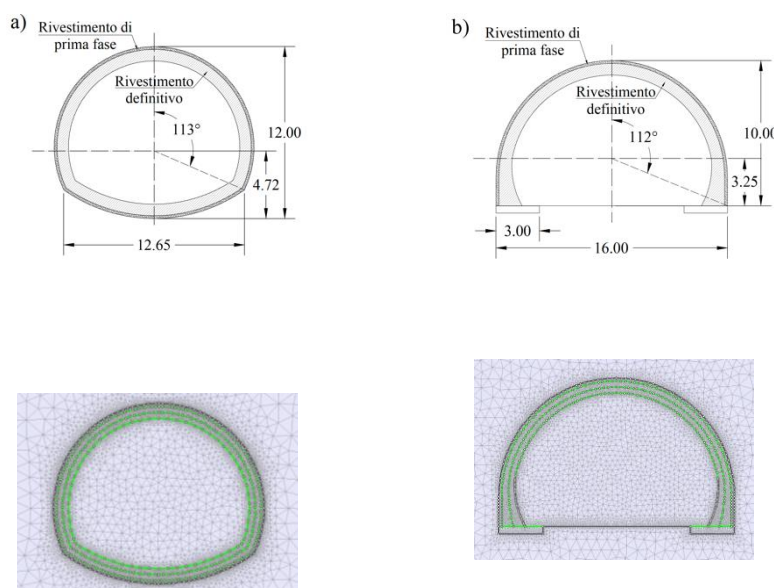


Figura 1. a) Sezione a ferro di cavallo con arco rovescio; b) sezione a ferro di cavallo senza arco rovescio.

I bordi esterni dei modelli sono posizionati a una distanza sufficiente per minimizzare gli effetti di bordo. Le condizioni tensionali sono assunte costanti con la profondità (profondità asse galleria = 100 m) e caratterizzate da un coefficiente di spinta a riposo k_0 pari a 1.

Sia per l'ammasso roccioso che per i rivestimenti è stata adottata una legge costitutiva di tipo elasto-plastico ideale con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb. Per l'ammasso roccioso sono stati considerati due scenari con lo scopo di valutare l'influenza della qualità dell'ammasso sui fenomeni di degradazione. A tal fine è stato assunto un valore di GSI (Geological Strength Index) pari a 50 per rappresentare un ammasso roccioso di media qualità e un valore più basso, pari a 30,

per un ammasso di qualità inferiore. Per quanto riguarda invece il rivestimento di prima fase, per ammassi rocciosi di bassa qualità il rivestimento è composto da 20 cm di calcestruzzo proiettato C20/25 accoppiato con centine d'acciaio NP180 ogni 0,5 m. In questo caso, per il calcolo numerico, è stata necessaria la definizione di un mezzo equivalente le cui proprietà sono state calcolate utilizzando il metodo proposto da Carranza-Torres (2004). Per l'ammasso roccioso di media qualità il rivestimento di prima fase consiste invece in 20 cm di calcestruzzo proiettato C20/25. Infine, per il rivestimento definitivo è stato assunto un calcestruzzo C30/37. Le proprietà meccaniche e di deformabilità adottate per i materiali del modello sono riportate nella Tabella 2.

Tabella 2. Proprietà dei materiali utilizzate nell'analisi parametrica.

	Ammasso roccioso		Supporto primario		Rivestimento definitivo C30/37
	GSI 30	GSI 50	Calcestruzzo proiettato C20/25	Composito	
γ [kN/m ³]	29	29	24	24	24
E [MPa]	7600	1600	16000 (matrice) 65000 (inerti)	33600	32800
ν [-]	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
f_{ck} [MPa]	-	-	20	-	30
f_{cd} [MPa]	-	-	11.33	-	17
ϕ [°]	28	22.5	37	37	37
c [MPa]	2.7	1	2.83	4.69	4.24
σ_t [MPa]	0.19	0.02	1.47	2.07	2.88

2.2 Simulazione dello scavo delle gallerie e installazione dei rivestimenti

Per simulare il processo di realizzazione della galleria sono stati sviluppati quattro modelli numerici che combinano i due casi di GSI e le due tipologie di geometria. Inizialmente si è riprodotto lo scavo in condizioni intrinseche, misurando gli spostamenti radiali (u_{rx}) lungo la corda verticale di calotta e quella orizzontale nella mezzeria dei piedritti, ad ogni fase di riduzione della pressione interna (p_i), al fine di costruire le curve caratteristiche e, successivamente, le curve LDP - Longitudinal-Displacement Profile (Vlachopoulos & Diederichs, 2009). Per determinare le linee caratteristiche si è assunta una distanza tra il fronte e il punto di installazione del sostegno di prima fase di 1 o 2 m, rispettivamente per il caso di ammasso roccioso di bassa o media qualità. Dalle analisi è stata valutata una pressione interna di rilascio pari al 40% di quella iniziale ($\lambda = 0.6$) corrispondente al momento dell'installazione del rivestimento di prima fase. Successivamente, a rilascio completo della pressione interna del cavo, si è simulata l'installazione del rivestimento definitivo.

2.3 Simulazione del processo di degrado

Per simulare il processo di carico del rivestimento definitivo nel lungo termine è stata simulata la degradazione dell'ammasso roccioso e del rivestimento di prima fase. Per quanto riguarda l'ammasso roccioso, l'approccio utilizzato si basa sullo studio di Showkati et al. (2021), che prevede il degrado dei parametri di deformabilità e di resistenza dell'ammasso attraverso le relazioni dipendenti dal tempo riportate nelle equazioni (1), (2) e (3) in riferimento agli intervalli temporali di 25, 50, 75 e 100 anni. Per il rivestimento di prima fase, similmente alle metodologie di degradazione proposte da Ziller & Cont (2018) e Usman & Galler (2013), sono stati ridotti gradualmente i parametri di resistenza e deformabilità fino ad un limite dell'80% di degrado come suggerito da Showkati et al. (2021). Tale riduzione è stata effettuata linearmente fino al 20% del valore iniziale di tali parametri e suddivisa proporzionalmente nei medesimi istanti temporali adottati per la degradazione dell'ammasso (25, 50, 75, 100 anni).

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

Per studiare l'influenza della degradazione nei diversi scenari previsti, si è fatto riferimento alle sollecitazioni di sforzo normale, momento flettente e taglio calcolate nel rivestimento definitivo a seguito del trasferimento del carico su quest'ultimo. La Figura 2 riporta, per ogni scenario, l'evoluzione nel tempo delle sollecitazioni del rivestimento definitivo alla base dei piedritti e in calotta.

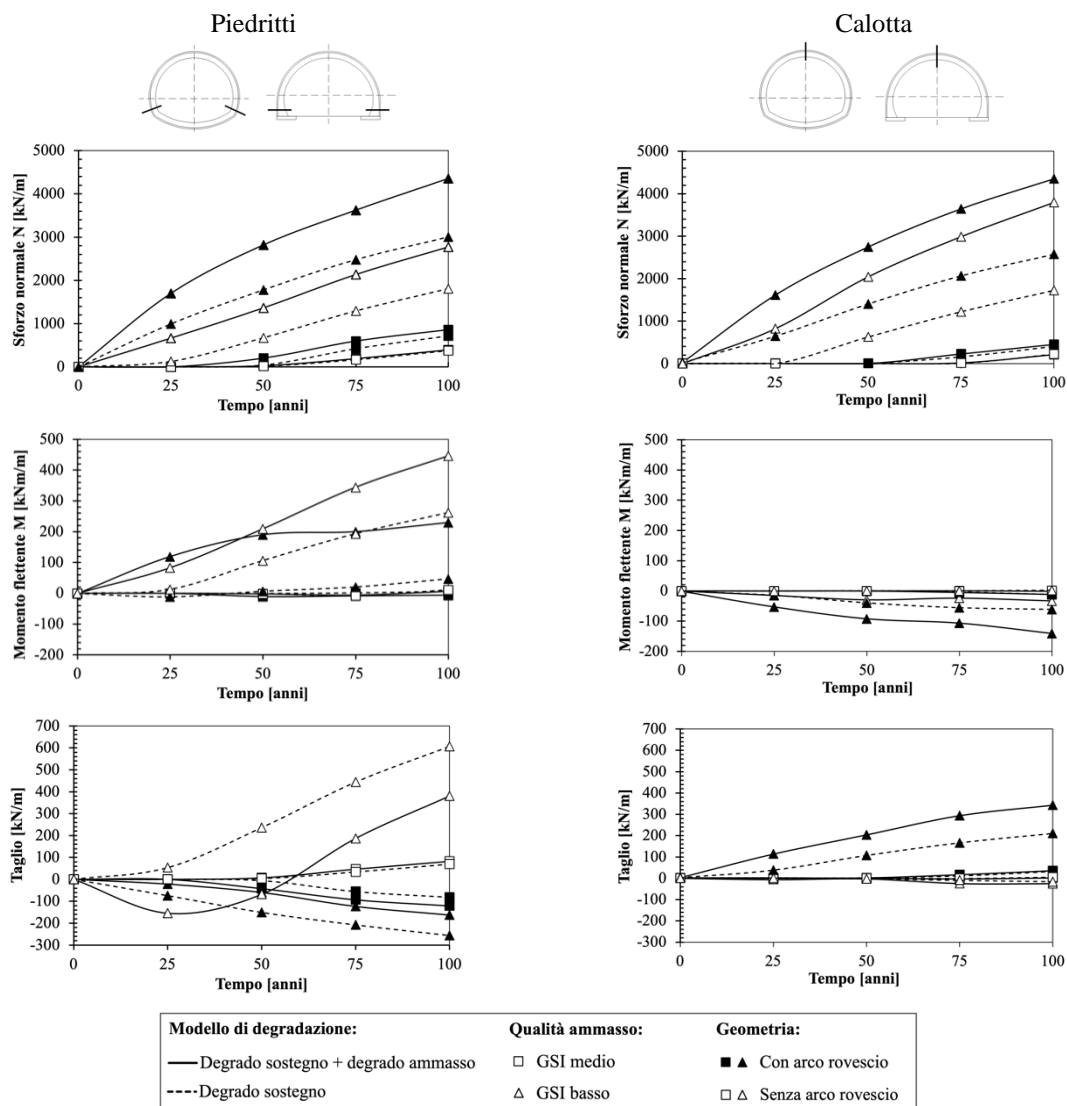


Figura 2. Evoluzione nel tempo delle sollecitazioni nel rivestimento definitivo per gli scenari considerati.

Il primo risultato interessante ottenuto dalle analisi condotte riguarda la possibilità di valutare il progressivo aumento delle sollecitazioni in funzione della degradazione del rivestimento di prima fase e dell'ammasso nel tempo. Tale aspetto non è invece apprezzabile nella metodologia tradizionale, la quale considera la sola condizione di fine vita del sostegno di prima fase. A tal proposito, viene proposto in Figura 3 un confronto esemplificativo tra i risultati ottenuti dalla metodologia di degrado proposta nella presente ricerca e i risultati ottenibili con l'utilizzo del metodo tradizionale (degrado totale istantaneo del sostegno di prima fase) per lo scenario più critico di ammasso roccioso di scarsa qualità. Il metodo tradizionale indica il valore asintotico

verso cui tendono tutti i risultati ottenuti con la metodologia di degrado qui proposta, i quali tuttavia spesso non raggiungono tale valore nemmeno dopo 100 anni. Si osserva inoltre una forte non linearità della variazione delle sollecitazioni nel tempo.

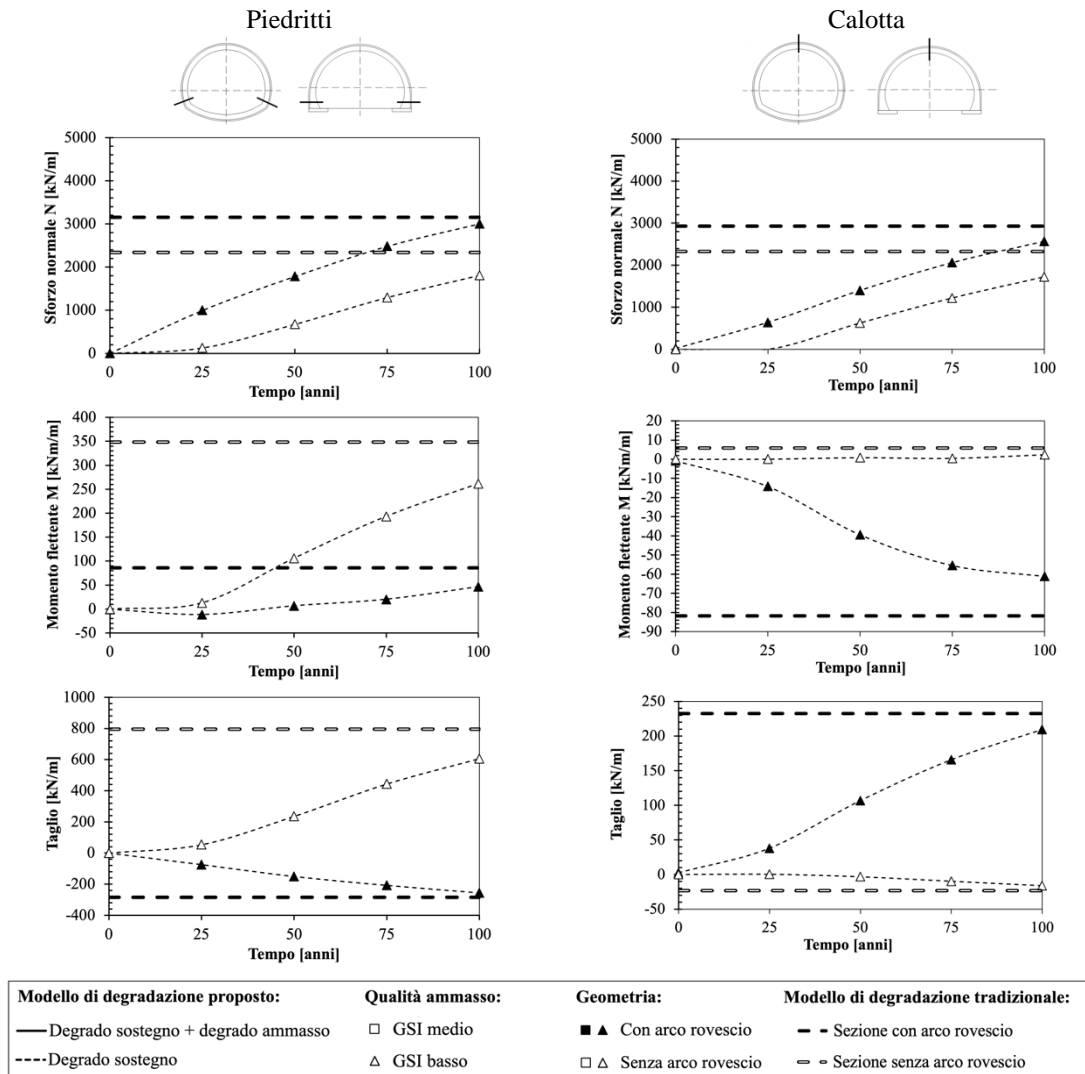


Figura 3. Confronto di esempio tra risultati del modello di degradazione proposto e quello tradizionale per lo scenario di ammasso roccioso scadente.

3.1 Influenza della geometria della sezione

Dai risultati mostrati nella Figura 2 per tutti gli scenari selezionati è possibile osservare come, a parità delle altre condizioni (modello di degrado e qualità dell'ammasso), a seguito del trasferimento dei carichi, la sezione con arco rovescio presenta valori maggiori di sforzo normale di compressione sia in calotta che in piedritto rispetto alla sezione sprovvista di arco rovescio. In aggiunta, il rivestimento definito continuo (presenza di arco rovescio) consente una migliore ridistribuzione degli sforzi interni. La sezione con arco rovescio è risultata maggiormente incline ad un comportamento prevalente (e preferibile) di compressione rispetto a quella aperta senza arco rovescio che mostra un comportamento prevalente a pressoflessione. Quest'ultimo può risultare problematico in caso di rivestimento definitivo non armato.

3.2 Influenza della degradazione dell'ammasso roccioso

In riferimento al modello di degrado adottato per simulare il trasferimento di carico al rivestimento definitivo nel lungo termine, i risultati nella Figura 2 mostrano andamenti simili di variazione dello stato di sollecitazione per entrambi i modelli (degradazione del solo rivestimento di prima fase o accoppiato alla degradazione dell'ammasso roccioso). Ciononostante, il modello di degrado che considera anche la degradazione dell'ammasso roccioso mostra un aumento più significativo delle sollecitazioni nel tempo.

3.3 Influenza della qualità dell'ammasso roccioso

La qualità dell'ammasso roccioso è uno dei fattori che influenza maggiormente il trasferimento dei carichi sul rivestimento definitivo. A parità di altre condizioni (modello di degrado e sezione geometrica), la qualità dell'ammasso roccioso gioca un ruolo chiave sullo stato di sforzo indotto sul rivestimento di prima fase durante lo scavo della galleria. A parità di profondità, un ammasso più performante durante lo scavo si deformerà meno trasmettendo pertanto meno carico al sostegno di prima fase con un trasferimento più tardivo dei carichi al rivestimento definitivo. Infatti, facendo riferimento alle sollecitazioni mostrate in Figura 2, nel caso di un ammasso roccioso con GSI medio gli effetti della degradazione diventano evidenti, per quasi tutti i casi, solo dopo 50 anni. Al contrario, in un ammasso roccioso di scarsa qualità, l'aumento delle sollecitazioni inizia a risultare significativo a partire da 25 anni.

4 CONCLUSIONI

Le analisi numeriche condotte evidenziano implicazioni significative per la progettazione delle gallerie, in particolare riguardo alla stabilità complessiva delle infrastrutture in fase di invecchiamento. Un risultato rilevante è rappresentato dall'impatto della degradazione del rivestimento di prima fase sul comportamento strutturale della galleria. Questo fenomeno comporta un progressivo trasferimento dei carichi al rivestimento definitivo, con un conseguente aumento delle sollecitazioni. Tale redistribuzione dei carichi evidenzia la necessità di progettare rivestimenti definitivi in grado di sopportare carichi significativamente maggiori, man mano che il rivestimento primario si degrada.

L'attività condotta ha consentito di evidenziare l'importanza di tenere in considerazione, nella progettazione delle gallerie, la degradazione a lungo termine sia dei rivestimenti di prima fase sia dell'ammasso roccioso, in particolare quando si opera in presenza di ammassi di bassa qualità.

L'uso di modelli numerici e di adeguate leggi di degrado consente una rappresentazione più accurata delle interazioni a lungo termine tra il rivestimento e l'ammasso roccioso. Adottando modelli di degradazione come quelli proposti da Showkati et al. (2021) per l'ammasso roccioso e Ziller & Cont (2018) e Usman & Galler (2013) per il rivestimento di prima fase, è possibile simulare efficacemente il graduale processo di invecchiamento e poter stimare la trasmissione dei carichi al rivestimento definitivo nel tempo, sia durante la progettazione di gallerie nuove sia in fase di verifica di gallerie esistenti. Il processo di verifica di gallerie esistenti in fase di invecchiamento può quindi tradursi nelle seguenti fasi:

- identificazione delle caratteristiche della sezione trasversale della galleria e della qualità dell'ammasso roccioso;
- valutazione del potenziale di degrado dell'ammasso roccioso secondo Showkati et al. (2021) per il periodo di riferimento;
- valutazione della degradazione del rivestimento di prima fase secondo Usman & Galler (2013) per il periodo di riferimento;
- sviluppo dell'analisi numerica per il calcolo dello stato di sollecitazione attuale del rivestimento e confronto con le resistenze al fine di valutare lo stato di salute della galleria.

Sarà utile, in futuro, analizzare dati di monitoraggio sul comportamento dei rivestimenti definitivi di gallerie esistenti per confermare l'attendibilità della metodologia proposta.

BIBLIOGRAFIA

- Carranza-Torres, C. 2004. Modeling composite sections (e.g., steel sets and shotcrete) with FLAC and Phase 2.
- Galler, R. & Lorenz, S. 2018. Support elements in conventional tunneling – Focus on long-term behavior. *Underground Space* 3(4): 277-287.
- Helmut, R.A. & Danica H.T. 1966 “Elastic Moduli of Hardened Cement and Tricalcium Silicate Pastes: Effect of Porosity” Portland Cement Association, Research and Development Laboratories, Research Bulletin 1966, Skokie, USA.
- Huisman, M., Robert, H., Kenneth, G. & Nieuwenhuis, J. D. 2006. Predicting Rock Mass Decay in Engineering Lifetimes: The Influence of Slope Aspect and Climate. *Environmental & Engineering Geoscience* 12(1): 39-51.
- Neville, A. M. & Brooks, J. J. 1987. *Concrete technology*. Harlow: Longman Sc.
- Rocscience 2024. RS2. Version 11.0. 2D Finite Element Analysis Software.
- Showkati, A., Salari-rad, H. & Hazrati, M. 2021. Predicting long-term stability of tunnels considering rock mass weathering and deterioration of primary support. *Tunnelling and Underground Space Technology* 107.
- Usman, M. & Galler, R. 2013. Long-term deterioration of lining in tunnels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 64: 84-89.
- Vlachopoulos, N. & Diederichs, M. 2009. Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels. *Rock Mech Rock Eng* 42: 131-146.
- Ziller, L. & Cont, M. 2018. Evaluation of long-term ground load on conventional tunnel linings. In *Proc. World Tunnel Congress, Dubai (United Arab Emirates), 21-26 April 2018*.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF THE LONG-TERM LOAD ON TUNNEL LININGS

Keywords: tunnel linings, degradation, rock mass, finite element modelling

Tunnel linings constructed using traditional techniques are typically composed of two layers. The outer layer (i.e. primary lining), is installed immediately after excavation and is designed to ensure the needed stability of the ground, allowing partial stress release in the rock mass. The inner layer, or final lining, is usually applied at a later stage and is designed to withstand long-term ground loads. Current design practices for simulating the load transfer between the two linings assume that the entire load supported by the primary lining is transferred at the end of its life to the final lining. However, it is demonstrated that, even after 30-40 years, limited ground loads act on the final lining. This paper investigates load transfer mechanisms between linings, considering different levels of deterioration of the sprayed concrete and steel ribs. Finite element analysis is used to study this process parametrically and identify less conservative yet reliable design choices.