

NUOVO CUNICOLO DI ACCESSO ALLA GALLERIA DI BASE DEL CENERI: SFIDE PROGETTUALI E SOLUZIONI PER LA RIDUZIONE DEI CEDIMENTI

Davide Merlini ¹ (davide.merlini@pini.group), Filippo Gianelli ¹ (filippo.gianelli@pini.group), Gianluca Bella ¹ (gianluca.bella@pini.group), Alessandro Flematti ¹ (alessandro.flematti@pini.group), Matteo Falanesca ¹ (matteo.falanesca@pini.group)

¹Pini Group SA, Lugano, Svizzera

ABSTRACT. Il presente articolo analizza i principali esiti di un'ampia campagna di monitoraggio realizzata per valutare i cedimenti a seguito alla posa di precarichi antecedenti alla realizzazione di una galleria artificiale in calcestruzzo armato da realizzarsi nell'ambito del progetto "Cunicolo di accesso di Sigirino". Tali precarichi hanno l'obiettivo di minimizzare i cedimenti al di sotto della struttura, successivamente ritombata, che sarà fondata su alternanze di terreni deformabili quali limi argillosi e sabbie limose in condizioni sature. I risultati di monitoraggio sono inoltre confrontati con quelli ottenuti da analisi numeriche agli elementi finiti (FEM), al fine di predire la risposta deformativa e tensionale della struttura in fase d'esercizio, fornendo dunque le basi per un'adeguata progettazione della galleria stessa.

1. INTRODUZIONE

La previsione dell'entità dei cedimenti e la loro evoluzione nel tempo è una tematica di primaria importanza nelle verifiche allo stato limite di servizio delle strutture. Mentre lo stato limite ultimo rappresenta uno scenario che il progettista costruisce introducendo combinazioni sfavorevoli di azioni e stime prudenziali della resistenza dei materiali in un modello conservativo, lo stato limite di servizio introduce assunzioni quanto più possibile aderenti alla realtà. L'entità dei cedimenti influenza la funzionalità della struttura stessa e la definizione di opportuni valori soglia è connessa alla sua tipologia e destinazione d'uso. In accordo alla teoria della consolidazione monodimensionale, l'applicazione di un carico su una fondazione di estensione limitata su un terreno saturo a grana fine determina l'insorgenza di sovrappressioni interstiziali. Al termine della fase di carico, si ha dunque un "cedimento immediato" dovuto a deformazioni di taglio. Con la successiva dissipazione delle sovrappressioni interstiziali il cedimento evolve nel tempo dando origine al "cedimento di consolidazione" seguito da un'aliquota finale detta "cedimento secondario" legata alla natura viscosa del terreno (Larsson, 1998; Lancellotta *et al.*, 2008). Il cedimento totale risulta dalla somma delle tre aliquote la cui importanza relativa dipende dalla natura del terreno e dalla velocità d'applicazione dei carichi. In tale contesto, l'applicazione di precarichi rappresenta oggi uno dei metodi maggiormente diffusi per consentire di scontare la maggior quota-parte possibile del cedimento di consolidazione prima della realizzazione delle opere. Il presente articolo analizza dunque l'efficacia di un sistema di precarichi volti a minimizzare i cedimenti al di sotto di una galleria artificiale che verrà realizzata su terreni coesivi sotto-falda posta a ca. 1÷2m dal piano campagna. I risultati ottenuti da un sistema di monitoraggio in continuo sono confrontati con le analisi numeriche FEM per valutare la risposta deformativa del manufatto in esercizio e progettare eventuali ulteriori interventi di riduzione dei cedimenti.

2. CASO STUDIO: ASPETTI PROGETTUALI E SFIDE GEOTECNICHE

Nell'ambito del progetto "Cunicolo di accesso di Sigirino" è prevista la realizzazione di un collegamento di servizio per la nuova Galleria di base del Ceneri (GbC), in Svizzera in esercizio dal dicembre 2020 (Merlini *et al.*, 2017). Il nuovo cunicolo d'accesso (FIS), già scavato come galleria logistica nell'ambito dei lavori principali, rappresenta l'accesso per il personale delle ferrovie federali svizzere per eseguire le operazioni di manutenzione della GbC. Presso il portale del nuovo cunicolo d'accesso è prevista la realizzazione di una galleria artificiale (GA) per garantire la continuità con l'esterno anche una volta realizzato il deposito definitivo di Sigirino (altezza massima ritombamento ca. 28m). La Galleria artificiale è un manufatto in calcestruzzo armato di lunghezza ca. 69.0m a struttura scatolare variabile come mostrato in Fig1: i) la tratta in prossimità del portale ha sezione rettangolare (altezza=4.80m, larghezza interna=4.40m; spessore platea=1.00m, spessore elevazioni=0.40m, sez.

AA Fig. 1c); ii) la tratta in prossimità del portale FIS in roccia ha sezione esagonale (altezza massima=6.15m, larghezza netta=6.0m, spessore platea=1.0m, spessore elevazioni=0.80m, sez. BB Fig. 1c).

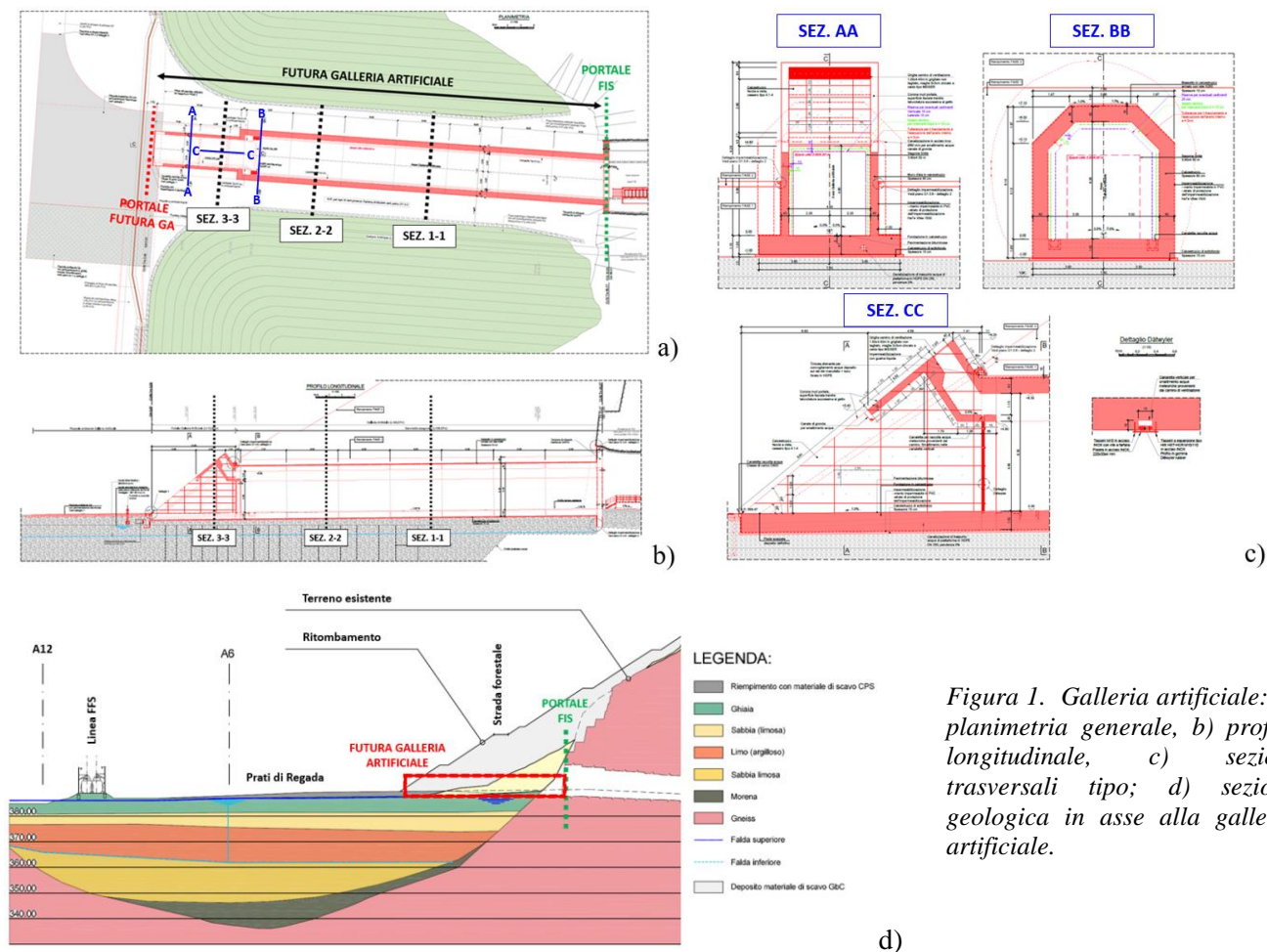


Figura 1. Galleria artificiale: a) planimetria generale, b) profilo longitudinale, c) sezioni trasversali tipo; d) sezione geologica in asse alla galleria artificiale.

La Galleria artificiale sorgerà in prossimità del piede del deposito nella zona dei Prati di Regada. Procedendo dall'alto verso il basso si possono distinguere le seguenti formazioni geologiche principali: i) "suolo organico" ca. 0.5÷1.0 m; ii) "riempimento": strato di materiale di ripiena o rimaneggiato, fino a 4 m; iii) "ghiaia": strato di sabbia ghiaiosa con molti ciottoli e poco limo sede del principale acquifero, con spessore ca. 5÷6 m; iv) "sabbia limosa" e "depositi fluvio-lacustri", con spessore ca. 6÷7 m; v) "limo argilloso": strato di limo argilloso con sabbia fine inconsistente, depositi lacustri, con spessore tra i 9 e i 17 m; vi) "Sabbia limosa profonda": strato di sabbia fine limosa compatta, depositi glacio-lacustri, con spessore variabile tra 0 e 15 m; vii) "morena": strato di sabbia ghiaiosa con limo, depositi morenici, con spessore 1-2 m; viii) "Gneiss" poco alterato e poco fratturato. In prossimità dell'attacco con la FIS, per una lunghezza di circa 14.0 m, è presente un affioramento roccioso. (Fig.1d)

3. SOLUZIONI PER LA RIDUZIONE DEI CEDIMENTI E SISTEMA DI MONITORAGGIO

Nel periodo Settembre 2020-Luglio 2021 sono stati realizzati dei precarichi laterali nei settori Sud e Nord della zona in corrispondenza della quale sarà realizzata la GA con l'obiettivo di far scontare, prima della realizzazione della GA stessa, la maggior aliquota possibile di cedimenti. I cedimenti verticali conseguenti l'applicazione dei precarichi laterali sono misurati automaticamente mediante un sistema di monitoraggio in continuo tramite assestimetri (AS). Posti alla quota di ca. 390 m s.l.m., essi si trovano in corrispondenza di tre sezioni trasversali alla futura GA, a differenti distanze dal portale della stessa (Fig.2a), rispettivamente Sez. 1-1 (distanza +40.58m), Sez. 2-2 (distanza +25.71m) e Sez. 3-3 (distanza +10.86m). I cedimenti sono valutati con riferimento a un punto fisso e ad essi si affiancano inclinometri (INC) e piezometri (F) posti in foro a differenti profondità (Fig.2b). La lettura in continuo delle sovrappressioni e dei cedimenti verticali nei punti di interesse avviene mediante apposita piattaforma web.

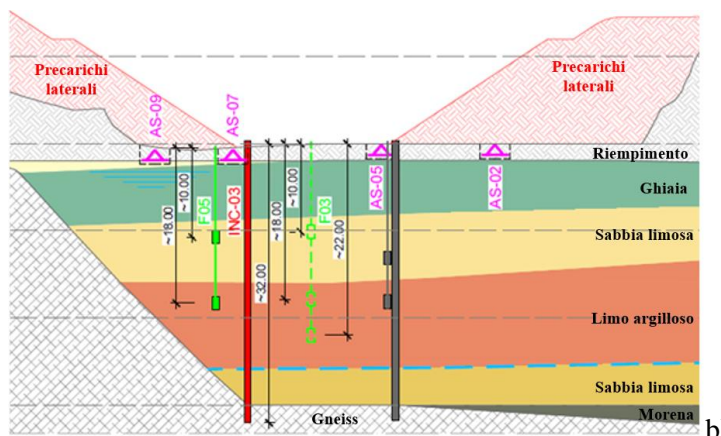
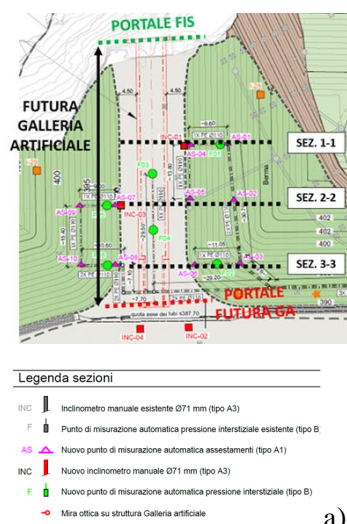


Figura 2. a) Planimetria area oggetto di monitoraggio; b) sezione trasversale 2-2 e strumentazione (precarichi laterali in rosso).

4. ANALISI NUMERICHE E CONFRONTO CON I DATI MONITORATI

Le analisi numeriche bidimensionali delle sezioni trasversali significative sono state effettuate mediante il codice di calcolo agli elementi finiti Plaxis 2D CE (Vers. 21.01.00.479) in condizioni drenate (lungo termine), di deformazioni piane, applicando cerniere sul bordo inferiore e carrelli sui bordi laterali. Modelli di dimensioni tali da evitare effetti di bordo sono stati realizzati con mesh di 10'000 elementi triangolari opportunamente infittita. È stata adottata la legge costitutiva Hardening-Soil per i terreni, mentre l'applicazione dei precarichi laterali è simulata applicando progressivamente opportuni sovraccarichi in altrettanti step. Un'analisi di tipo "gravity loading" è eseguita per la fase iniziale e calcolo plastico per le fasi successive di applicazione dei precarichi laterali. I parametri geotecnici adottati sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1. Proprietà geotecniche.

| Proprietà | Riempimento | Ghiaia | Sabbia limosa | Limo argilloso | Sabbia limosa | Morena | Gneiss |
|---|---------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|--------|
| Coesione, c' [kPa] | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 5.0 | 1000 |
| Angolo d'attrito, ϕ [°] | 37 | 38 | 33 | 20 | 35 | 38 | 40 |
| Peso unità di volume, γ [kN/m ³] | 22 | 20 | 19 | 19 | 20 | 20 | 27 |
| Coefficiente di spinta, k_0 [-]* | 0.39 | 0.38 | 0.45 | 0.65 | 0.42 | 0.38 | 0.7 |
| Modulo elastico, E [MPa] | 100.0 | 75.0 | 35.0 | 5.0 | 35.0 | 78.0 | 5000 |
| Coefficiente Poisson, ν [-] | 0.20 | 0.27 | 0.32 | 0.33 | 0.30 | 0.27 | 0.20 |
| Conducibilità, k [m/giorno] | $0.1 \cdot 10^{-3}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ | $0.01 \cdot 10^{-3}$ | $10^{-8} \cdot 10^{-9}$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | - |

*Gneiss: k_0 valutato mediante prove in situ. Terreni: k_0 valutato mediante la correlazione $1 - \sin(\phi)$ nell'ipotesi di normal consolidazione.

La misura dell'andamento dei cedimenti nel tempo, dall'applicazione dei precarichi ad oggi, evidenzia un'importante aliquota cedimento sviluppata entro il periodo di esecuzione dei precarichi (dal 19.09.20 al 19/26.03.2021) ed una generale tendenza alla stabilizzazione (Fig.3a). Con riferimento alle sezioni trasversali 1-1, 2-2, 3-3 lungo l'asse longitudinale della GA (Fig.3b: linea blu/arancione/grigia), il valor medio dei cedimenti monitorati dagli assestimetri piu' prossimi all'asse della futura galleria è circa 60 mm.

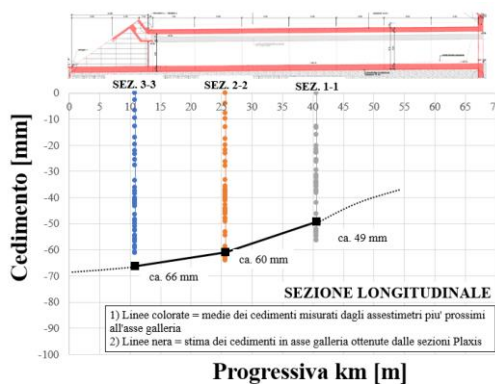
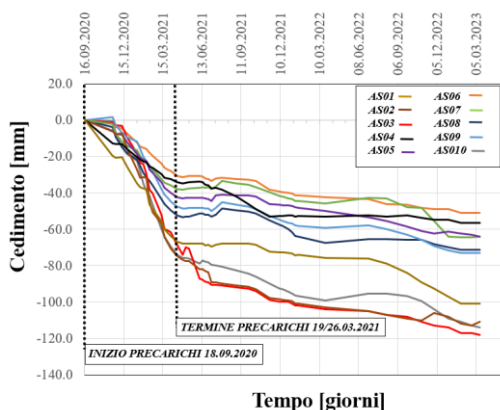


Figura 3. a) Andamento dei cedimenti nel tempo tramite misurazione assestimetri AS01-AS10; b) Sezione longitudinale in asse alla GA: cedimenti monitorati (media dei valori misurati dagli assestimetri prossimi all'asse galleria) al 13.03.2023.

Una stima preliminare dei cedimenti longitudinali in asse al manufatto è stata effettuata tramite le tre sezioni Plaxis corrispondenti alle sezioni di monitoraggio (linea nera): il cedimento longitudinale stimato e monitorato presenta valori assolutamente comparabili. In direzione trasversale, un confronto tra i cedimenti misurati alle sezioni 1-1, 2-2, 3-3 e le stime fornite dai modelli numerici è proposta in Fig.4a-b-c. In termini generali i cedimenti stimati mediante analisi FEM trovano buona corrispondenza con quelli misurati per le sezioni 2-2 e 3-3. Viceversa, le misure strumentali fornite dagli assestimetri AS04 e AS01 danno valori inferiori rispetto alle previsioni Plaxis. Questa differenza è motivata dal fatto che l'analisi numerica è condotta in condizioni 2D, pertanto gli effetti 3D non vengono intrinsecamente colti. La sezione trasversale 1-1 è infatti quella maggiormente prossima al portale FIS e al substrato di roccia affiorante che, a motivo della propria rigidezza e dell'inclinazione molto accentuata, influenza i cedimenti in corrispondenza delle sezioni limitrofe. Tale effetto, puramente tridimensionale, non è colto nella modellazione della sezione 1-1 nella quale l'adiacenza di orizzonti più rigidi non può essere colta. Viceversa, le sezioni trasversali 2-2 e 3-3 presentano una geologia più omogenea in direzione longitudinale, pertanto gli effetti tridimensionali rivestono un'importanza inferiore e dunque le stime risultano meglio confrontabili con il riscontro del monitoraggio. Si riscontra infine che i cedimenti lato Sud sono sistematicamente maggiori di quelli lato Nord a motivo dell'immersione della roccia in direzione trasversale.

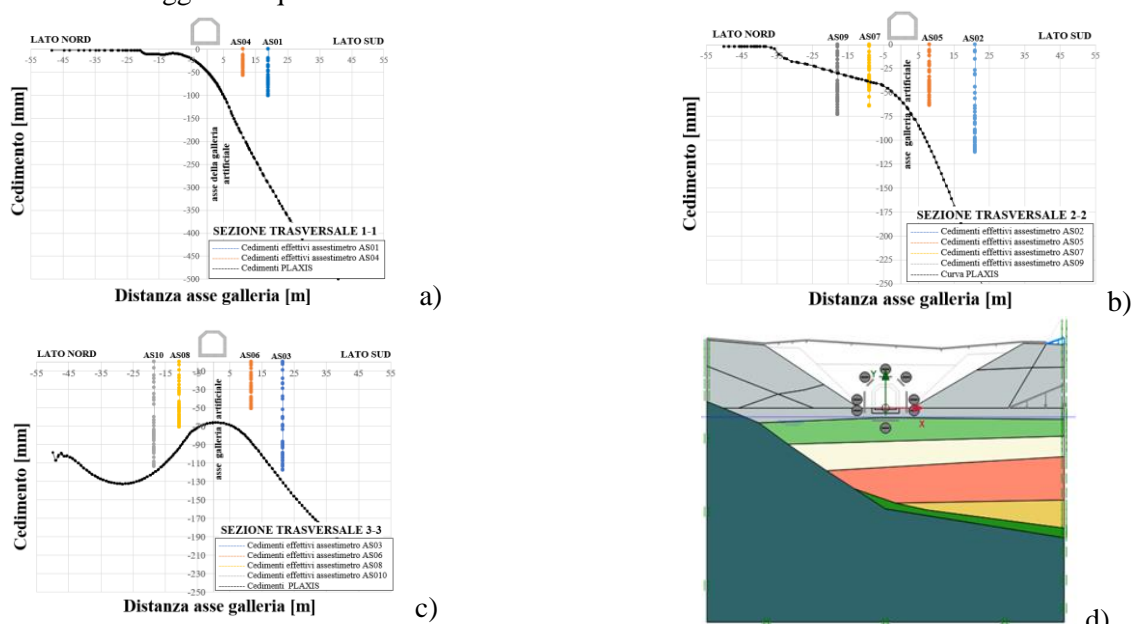


Figura 4. Confronto cedimenti teorici Plaxis alla quota di max altezza del precarico (linea nera) con i cedimenti monitorati: a) sezione trasversale 1-1; b) sezione trasversale 2-2; c) sezione trasversale 3-3; d) modello Plaxis: sezione 2-2.

5. CONCLUSIONI

La presente nota illustra le misure intraprese per minimizzare i cedimenti indotti dalla costruzione di una galleria artificiale su terreni coesivi saturi, e successivamente ritombata. Una serie di precarichi laterali sono stati realizzati ed i contestuali cedimenti misurati e confrontati con quelli ottenuti da analisi numeriche FEM riscontrando tra essi una buona corrispondenza. Il confronto ha evidenziato l'importanza dell'analisi numerica come strumento predittivo. Un'ulteriore calibrazione dei modelli numerici è in corso. Essa è basata sui riscontri della presente campagna di misurazioni e consentirà una realistica valutazione dell'effetto di ulteriori precarichi in corso di esecuzione prima del completamento del manufatto previsto entro la fine del 2023.

6. BIBLIOGRAFIA

- Larsson R.L. (1998). Calculation of Settlements of Shallow Foundations on Sand and Silt Based on In Situ Test Results. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1614(1): 15-23.
- Lancellotta R., Costanzo D., Foti S. (2008). *Progettazione Geotecnica*. Hopeli.
- Merlini D, Stocker D, Falanesca M, Schuerch R. (2017). The Ceneri Base Tunnel: Construction Experience with the Southern Portion of the Flat Railway Line Crossing the Swiss Alps. *Engineering*. 4: 235-248.