

Analisi del rigonfiamento nella galleria Le Forche

*Original*

Analisi del rigonfiamento nella galleria Le Forche / Franchino, B.; Polizzi, M.; Spina, B.; El Amrani, A.; Ragazzo, G.; Barla, M.. - STAMPA. - (2024), pp. 17-20. (Intervento presentato al convegno XIII INCONTRO ANNUALE DEI GIOVANI INGEGNERI GEOTECNICI - IAGIG 2024 tenutosi a Torino nel 7 – 8 giugno 2024).

*Availability:*

This version is available at: 11583/2993127 since: 2024-10-07T14:21:54Z

*Publisher:*

Associazione Geotecnica Italiana AGI

*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)

## ANALISI DEL RIGONFIAMENTO NELLA GALLERIA LE FORCHE

Beatrice Franchino (bfranchino@systra.com)  
*SYSTRA SWS, Torino, Italia*

Miriam Polizzi (mpolizzi@systra.com)  
*SYSTRA SWS, Torino, Italia*

Beatrice Spina (bspina@systra.com)  
*SYSTRA SWS, Rende, Italia*

Abdessamad El Amrani (aelamrani@systra.com)  
*SYSTRA SWS, Torino, Italia*

Giuseppe Ragazzo (gragazzo@systra.com)  
*SYSTRA SWS, Torino, Italia*

Marco Barla (marco.barla@polito.it)  
*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino*

**ABSTRACT.** Negli ultimi decenni l'aumento dell'urbanizzazione, l'esigenza nel gestire un maggior flusso di traffico e la crescente domanda di risorse e servizi hanno portato ad investire sulle soluzioni in sotterraneo per le infrastrutture. In risposta a tali esigenze, la progettazione di gallerie ed opere in sotterraneo ha dovuto interfacciarsi con numerose problematiche legate alle più variegata tematiche; tra queste, il fenomeno del rigonfiamento. Questo articolo descrive l'analisi del fenomeno di rigonfiamento della Galleria Le Forche.

### 1. INTRODUZIONE

Il rigonfiamento in galleria, o swelling, è definito dall'ISRM come l'incremento di volume nel tempo che avviene per effetto di reazioni chimico-fisiche nel terreno, avente una specifica composizione mineralogica, in presenza di acqua a seguito del rilascio tensionale dovuto allo scavo. Con lo scopo di studiare il comportamento rigonfiante, occorre specificare quali sono i terreni e le rocce potenzialmente soggetti al fenomeno. Tra questi le argille, sedimenti aventi clasti con dimensioni  $<2\mu\text{m}$ , e le anidriti, le quali si trasformano in gessi mediante il fenomeno dell'idratazione, risultano particolarmente suscettibili.

Esistono numerose prove di laboratorio per identificare il potenziale di rigonfiamento in una roccia o in un terreno. Tra queste trova largo uso la diffrazione a raggi X. Mediante tale metodologia si determinano le % di quarzo, minerali argillosi e carbonati contenute in un campione, le quali vengono rappresentate da un unico punto sul diagramma triangolare avente per assi le % di ciascun minerale citato. In funzione della zona del diagramma in cui il punto ricade, si determina il grado di rigonfiamento del materiale: basso, medio e alto (Barla, 2008).

Per la quantificazione del rigonfiamento si usano generalmente prove edometriche o prove triassiali. In questo articolo si sono utilizzati i risultati di prove edometriche del tipo Huder-Amberg (1970). Tale prova viene svolta in edometro, dapprima ripristinando le condizioni iniziali in situ, poi saturando il campione e assoggettandolo ad una sequenza di gradini di scarico tensionale. L'interpretazione del risultato consente di ottenere la curva di rigonfiamento su un grafico semilogaritmico da cui si ricava il coefficiente di rigonfiamento K.

### 2. METODI DI ANALISI PER LA PROGETTAZIONE

In fase di progetto di una galleria è necessario riuscire a prevedere l'effetto del fenomeno di rigonfiamento sul rivestimento. Diversi autori hanno proposto soluzioni in tal senso, basate su metodi empirici e numerici (e.g. Kovari et al., 1988; Anagnostou, 1993; Wittke & Rissler, 1976; Barla, 2008). Spesso, per semplicità, si riduce il problema a quello della determinazione delle pressioni di rigonfiamento sul rivestimento da cui procedere con le verifiche statiche. Nel seguito, per la determinazioni di tali pressioni, si farà riferimento alle formulazioni di Wittke & Rissler (1976) e al metodo di Robert et al. (1997).

Il primo metodo è basato sui risultati della prova edometrica di Huder-Amberg e considera che il rigonfiamento si verifichi nelle zone in cui il primo invariante dello stato tensionale secondario a seguito dello scavo della galleria

risulta inferiore del primo invariante dello stato tensionale primario geostatico. Secondo il metodo di Robert et al. (1997) invece si ipotizza, arbitrariamente, uno strato di terreno potenzialmente rigonfiante al di sotto l'arco rovescio, che subisce un aumento dello spessore  $\Delta H$  esercitando una pressione  $\sigma'_N$  sull'arco rovescio. Definito lo spessore dello strato rigonfiante sulla base della stratigrafia del terreno e dell'estensione della fascia plastica attorno alla galleria, l'applicazione del metodo prosegue mediante l'esecuzione di modelli numerici, nei quali si impongono differenti valori di deformazione volumetrica nello strato rigonfiante. Per ciascun modello numerico si ricava un punto di coordinate  $(\log \sigma'_N, \Delta H/H)$  fino ad individuare una curva di rigonfiamento. Sullo stesso grafico semilogaritmico si riporta la curva ricavata tramite la prova edometrica di laboratorio Huder-Amberg. Dall'intersezione tra la curva di rigonfiamento e la curva di Huder-Amberg si determina il punto di equilibrio, a partire dal quale si individua la  $\epsilon_v$  finale da imporre nel modello numerico.

Al fine di effettuare un confronto tra le due metodologie di analisi selezionate, si è scelto di applicarle nel caso della galleria Le Forche per valutare la differenza in termini di dimensionamento del rivestimento definitivo. Tale ricerca è stata svolta in occasione del master di II° livello in "Progettazione sostenibile di opere geotecniche e gallerie" del Politecnico di Torino in partnership con l'azienda SYSTRA SWS.

### 3. CASO STUDIO: GALLERIA LE FORCHE

L'area di studio si colloca nella porzione nord-occidentale della regione Campania in provincia di Benevento (BN). La galleria Le Forche fa parte del progetto esecutivo di dettaglio per il raddoppio della linea Cancellone-Benevento sull'itinerario Napoli-Bari. La galleria scavata in tradizionale, avente un raggio di scavo equivalente di 6.5 m, presenta una configurazione a singola canna con doppio binario ed una lunghezza complessiva di circa 2247 m, di cui circa 83 m in artificiale. La galleria Le Forche attraversa un rilievo costituito dalle Argille Varicolori Superiori (ALV) appartenenti all'Unità del Fortore. Tale formazione per la litofacies a dominanza pelitica ALVa presenta caratteristiche meccaniche tali da rendere possibile lo sviluppo di elevate convergenze durante la fase di scavo e, in condizioni di rilascio tensionale indotto dallo scavo in presenza di acqua, potrebbe essere soggetta a fenomeni di rigonfiamento (Figura 1a). Tale comportamento è stato osservato durante le prove di rigonfiamento Huder-Amberg eseguite su campioni di ALVa prelevati a profondità di 18 m e 54 m dal p.c. L'interpretazione dei risultati sperimentali ha fornito due valori di coefficiente K pari rispettivamente a 2.7 e 6.1, in linea con valori di letteratura ottenuti per formazioni analoghe. Al fine di mitigare gli effetti rigonfianti, si è scelto di adottare in fase progettuale una sezione di scavo (C2p\*) caratterizzata da una centinatura estesa all'arco rovescio (centina puntone) come rivestimento provvisorio e da una maggiore curvatura dell'arco rovescio, rispetto alle sezioni utilizzate nelle altre tratte della galleria (Figura 1b). È, infatti, noto che il rilascio tensionale risulta maggiore nelle sezioni a ferro di cavallo e che in terreni suscettibili al rigonfiamento sia più raccomandabile impiegare una sezione circolare.

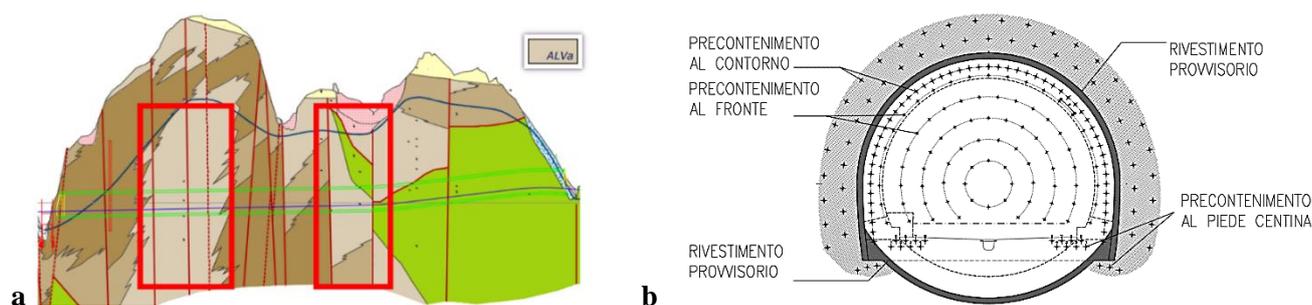


Figura 1. a) Profilo geomeccanico con evidenza della zona in ALVa. b) Sezione tipo C2p\*: scavo e consolidamenti.

#### 3.1 Creazione del modello numerico

Per studiare il comportamento della sezione tipo C2p\* della galleria Le Forche è stato realizzato un modello numerico bidimensionale agli elementi finiti, in condizioni di deformazione piana, mediante il software di calcolo Plaxis2D. La sezione analizzata è caratterizzata da una copertura massima di 80 m. Il comportamento delle ALVa è assunto di tipo elastico-perfettamente plastico con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb (Parametri del terreno:  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ,  $c' = 22 \text{ kPa}$ ,  $\phi' = 22^\circ$ ,  $E' = 300 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $K_0 = 0.8$ ,  $k = 10^{-8} \text{ m/s}$ ). L'analisi numerica è stata condotta in condizioni non drenate nel breve termine, con carico idraulico di 40 m da piano campagna. Nel modello di calcolo vengono simulate le principali fasi realizzative della galleria, i cui tassi di deconfinamento sono valutati con il metodo delle curve caratteristiche, tenendo conto degli interventi al fronte di scavo (80 elementi strutturali

tubolari in VTR, mostrati in Figura 1b, di lunghezza pari a 24 m con sovrapposizione minima di 12 m). Il precontenimento al contorno, realizzato con 51 elementi in VTR (Figura 1b), è simulato nel modello numerico con incrementi di coesione equivalente e di rigidità del terreno. Il rilascio tensionale  $\lambda$  risulta pari al 65% al fronte e all'80% con lo scavo dello sfondo elementare di 1 m. Si simula l'attivazione del rivestimento di prima fase in spritz-beton e centine ( $\lambda = 82\%$ ) mediante elementi plate, considerando la sola presenza dello spritz-beton (spessore 30 cm – C25/30). Il rivestimento definitivo della galleria è simulato con elementi finiti piani, assegnando un legame costitutivo elastico-lineare. Per ottenere le sollecitazioni sono stati introdotti nel modello degli elementi plate in linea d'asse ai rivestimenti definitivi caratterizzati da rigidità molto bassa (fattore di scala F pari a  $10^{-6}$ ), in modo da non interferire con il campo di sforzi e deformazioni interno dell'elemento di volume (spessore arco rovescio e murette 1.1 m – C30/37 –  $\lambda = 90\%$ , spessore di calotta e piedritti 1.0 m – C25/30 –  $\lambda = 100\%$ ).

Al termine del processo di scavo è stata simulata la fase di lungo termine con disattivazione dei rivestimenti provvisori e del consolidamento al contorno. Successivamente, si simula la fase di consolidazione con dissipazione delle sovrappressioni neutre. Nell'ultimo stage viene simulato il rigonfiamento.

### 3.2 Analisi del comportamento rigonfiante

L'analisi di rigonfiamento è stata realizzata applicando una pressione di rigonfiamento. In un primo caso, la pressione è stata imposta pari a 100 kPa in calotta-piedritti e 200 kPa in arco rovescio. Tali valori sono stati ottenuti analiticamente mediante le formulazioni di Wittke & Rissler (1976).

Nel secondo caso si è seguito l'approccio di Robert et al. (1997). In questo caso, per la definizione dello spessore dello strato rigonfiante, funzione della fascia plasticizzata attorno alla galleria, si è proceduto con la valutazione del raggio plastico attraverso il metodo delle curve caratteristiche, trattandosi di una galleria profonda. Mediante il software GV4S si è calcolato un raggio plastico pari a 8.8 m che, tenendo conto del raggio di scavo equivalente, restituisce una fascia plastica attorno allo scavo di circa 2.5 m. Per la determinazione dei punti di equilibrio, si è studiato separatamente il rigonfiamento in arco rovescio (AR) ed in calotta (CAL). Per ciascun valore di deformazione volumica imposto nello strato rigonfiante, si sono ottenuti gli spostamenti radiali lungo i bordi dello strato rigonfiante  $P_{02}$ , da cui si è determinata la deformazione  $\Delta H/H$ , e la tensione agente sul rivestimento  $\sigma'_N$  (Tabella 1). I risultati ottenuti per ciascuna deformazione volumetrica imposta, sono riportati in un grafico semi-logaritmico, ottenendo la curva di rigonfiamento. Dall'intersezione tra tale curva e quella relativa alla prova di Huder-Amberg, con coefficiente di rigonfiamento K pari a 6.1, si sono definite le deformazioni volumetriche da imporre nell'ultimo stage, pari a 0.67% per AR e pari a 0.55% per la CAL (Figura 2). Si sono distinti due casi di studio: caso 1) rigonfiamento applicato solo in AR; caso 2) rigonfiamento sia in AR che in CAL.

Tabella 1. Risultati dei sottomodelli numerici per ciascuna deformazione volumetrica imposta nello strato rigonfiante.

	Arco rovescio (AR)			Calotta (CAL)	
$\epsilon_v$ (%)	0.30	0.60	0.90	0.30	0.60
$\Delta H/H$ (%)	0.23	0.47	0.71	0.22	0.45
$\sigma'_N$ (kPa)	234	321	384	290	355

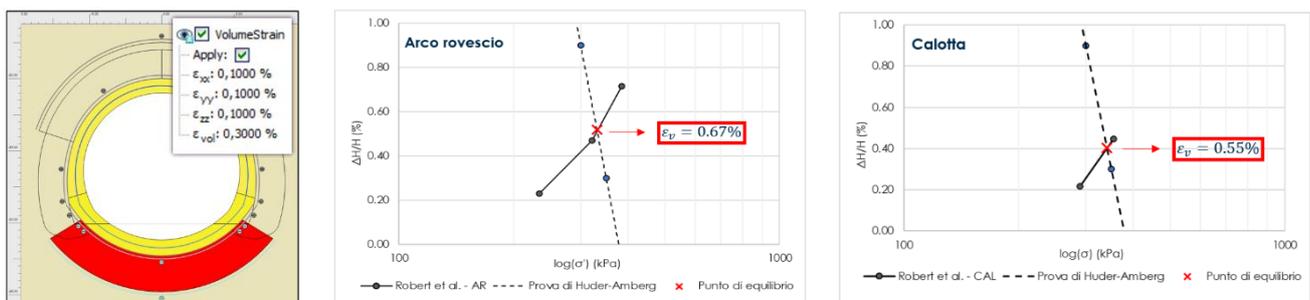


Figura 2. Creazione sottomodelli numerici per la determinazione dei punti di equilibrio per AR e CAL.

Per il caso 1), si è imposto nello strato rigonfiante in AR una deformazione di volume pari a  $\epsilon_v = 0.67\%$ . In termini di spostamento radiale del rivestimento definitivo, si sono osservati risultati confrontabili con quelli ottenuti mediante l'applicazione delle pressioni derivate dalle formulazioni di Wittke & Rissler (1976), con differenze

dell'ordine dei millimetri (Figura 3). In termini di sollecitazioni sul rivestimento definitivo, i calcoli hanno evidenziato un incremento dovuto al rigonfiamento maggiore con il metodo di Robert et al. (1997). In questo caso, infatti, la pressione di rigonfiamento applicata al rivestimento risulta pari a 221 kPa, maggiore dei 200 kPa determinati tramite Wittke & Rissler (1976).

Nel caso 2), si sono imposte deformazioni volumetriche pari a 0.67% e 0.55%, rispettivamente in AR e CAL. In termini di spostamento radiale, si è osservata un'inversione di segno sulla CAL (Figura 3). La pressione di rigonfiamento applicata secondo Robert et al. (1997) in CAL, corrispondente a  $\epsilon_v = 0.55\%$ , risulta pari a 163 kPa, maggiore dei 100 kPa determinati tramite Wittke & Rissler (1976). L'incremento di sollecitazioni osservato con il metodo di Robert et al. (1997) (Tabella 2) ha portato alla necessità di utilizzare una classe di resistenza del calcestruzzo maggiore (C30/37 in CAL e C35/45 in AR) rispetto a quella prevista da progetto esecutivo di dettaglio. Inoltre, è risultato necessario incrementare l'armatura a taglio in AR (da  $\phi 12/30/40$  a  $\phi 12/30/20$ ).

Tabella 2. Confronto dei risultati per i due metodi in termini di incremento di sollecitazione dovuto al rigonfiamento.

	Arco rovescio (AR)			Calotta (CAL)		
	$\Delta M_{MAX}$ (kNm/m)	$\Delta Q_{MAX}$ (kN/m)	$\Delta N_{MAX}$ (kN/m)	$\Delta M_{MAX}$ (kNm/m)	$\Delta Q_{MAX}$ (kN/m)	$\Delta N_{MAX}$ (kN/m)
Wittke & Rissler (1976)	678	306	803	290	168	666
Robert et al. (1997) CASO 1	816	314	810	-	-	-
Robert et al. (1997) CASO 2	1206	468	551	616	521	894

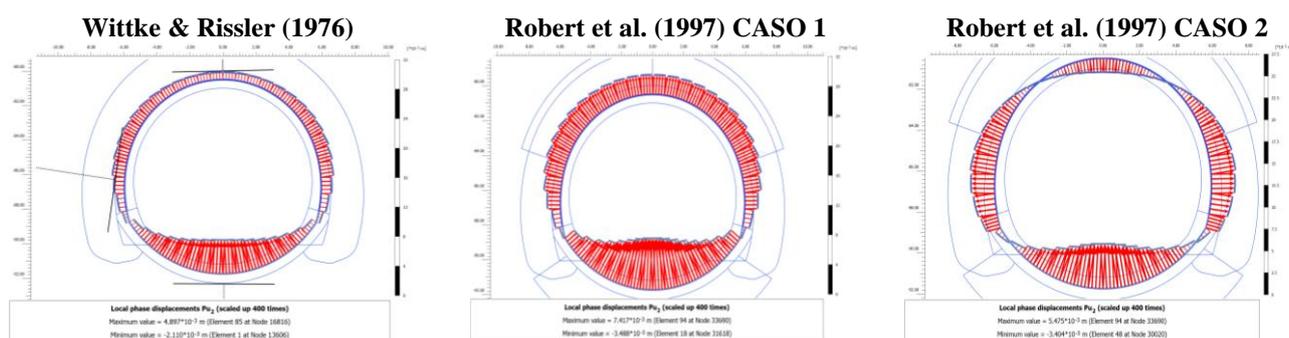


Figura 3. Confronto dei risultati per i due metodi in termini di spostamento radiale del rivestimento definitivo.

#### 4. CONCLUSIONI

Nei terreni potenzialmente rigonfianti è necessario minimizzare le zone di rilascio tensionale durante lo scavo, adottando sezioni di scavo circolari e scegliendo metodi di scavo più idonei. Nell'articolo si sono evidenziate le peculiarità delle diverse metodologie di calcolo, portando alla conclusione che, per il caso analizzato della Galleria Le Forche, il metodo di Robert et al. (1997) sia risultato maggiormente cautelativo rispetto al metodo di Wittke & Rissler (1976), per la progettazione del rivestimento definitivo, in entrambe le casistiche analizzate.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- Anagnostou G., 1993. A model for swelling rock in tunnelling. *Rock Mech. Rock Eng.* 26/4, 307–331.
- Barla M. (2008). Numerical simulation of the swelling behaviour around tunnels based on special triaxial tests. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, 508–521.
- Kovari K., Amstad Ch., Anagnostou G.: Design/construction methods – tunnelling in swelling rocks. In: *Proceedings of the 29<sup>th</sup> U.S. Symposium*. Balkema, Rotterdam, pp. 7–32 (1988)
- Huder J., Amberg G., 1970. Quellung in Mergel, Opalinuston und andyrit. *Schweizerische Bauzeitung* 88 (43), 975–980.
- Robert A., Saitta A., Colomb A., Cristia L., Dardard B., About N., Lebissonais H. (1997). Modélisation des effets du gonflement dans les ouvrages souterrains. *Tunnels et ouvrages souterrains* (143): 301-306.
- Wittke W., Rissler P. (1976). Dimensioning of the lining of underground openings in swelling rock applying the finite element method. *Pub. of the Inst. for Found. Eng., Soil Mech. and Water Ways Constr.*. RWTH University. Aachen 2: 7–48.