

ANALISI DELLA STABILITÀ DEL FRONTE DI SCAVO E DELL'INTERAZIONE TERRENO/STRUTTURA PER LA DEFINIZIONE DI UN PIANO DEI MONITORAGGI: IL CASO DELLA GALLERIA DELLA TRATTA *SECONDIGLIANO-DI VITTORIO* LUNGO LA LINEA 1 DELLA METROPOLITANA DI NAPOLI

Filippo Cavuoto (f.cavuoto@studiocavuoto.com)

ing. Filippo Cavuoto S.r.l.- Ingegneria delle Strutture, Infrastrutture e Geotecnica

Nicola De Falco (n.defalco @studiocavuoto.com)

ing. Filippo Cavuoto S.r.l.- Ingegneria delle Strutture, Infrastrutture e Geotecnica

ABSTRACT In questa nota si vuole rapidamente presentare l'esperienza di definizione del piano dei monitoraggi per lo scavo in sotterraneo della tratta tra le stazioni di *Secundigliano* e *Di Vittorio*, necessaria per la chiusura dell'anello della Linea 1 della Metropolitana di Napoli. Trattandosi di un'area fortemente urbanizzata ci si concentra sui monitoraggi da effettuare sugli edifici interessati dalle subsidenze dovute allo scavo della galleria. Importanti strumenti per la definizione di una categoria di rischio, della tipologia e della frequenza dei monitoraggi sono stati lo studio dell'interazione terreno/struttura e la valutazione della stabilità del fronte.

1. INTRODUZIONE – DESCRIZIONE DELL'OPERA

La realizzazione tratto di linea tra le stazioni di *Secundigliano* e *Di Vittorio* consentirà di chiudere l'anello della Linea 1 della *Metropolitana di Napoli* permettendo il collegamento tra le stazioni di *Piscinola/Scampia* e *Capodichino*. La galleria, di lunghezza pari a circa 530m, interessa un ambiente fortemente urbanizzato; i bassi ricoprimenti ($C \approx 2D$) e la notevole estensione del fronte ($V_{T,av} \sim 112m^2$) rendono i problemi di stabilità in fase di scavo e l'interazione terreno/struttura vincolanti dal punto di vista progettuale.

L'attuale progetto prevede lo scavo in tradizionale, in materiali di natura prevalentemente pozzolanica come si evince dalla seguente figura, con precontenimenti al fronte e presostegni al contorno costituiti, rispettivamente, da colonne orizzontali e doppia coronella di *roto-jet* ad *ombrello*.

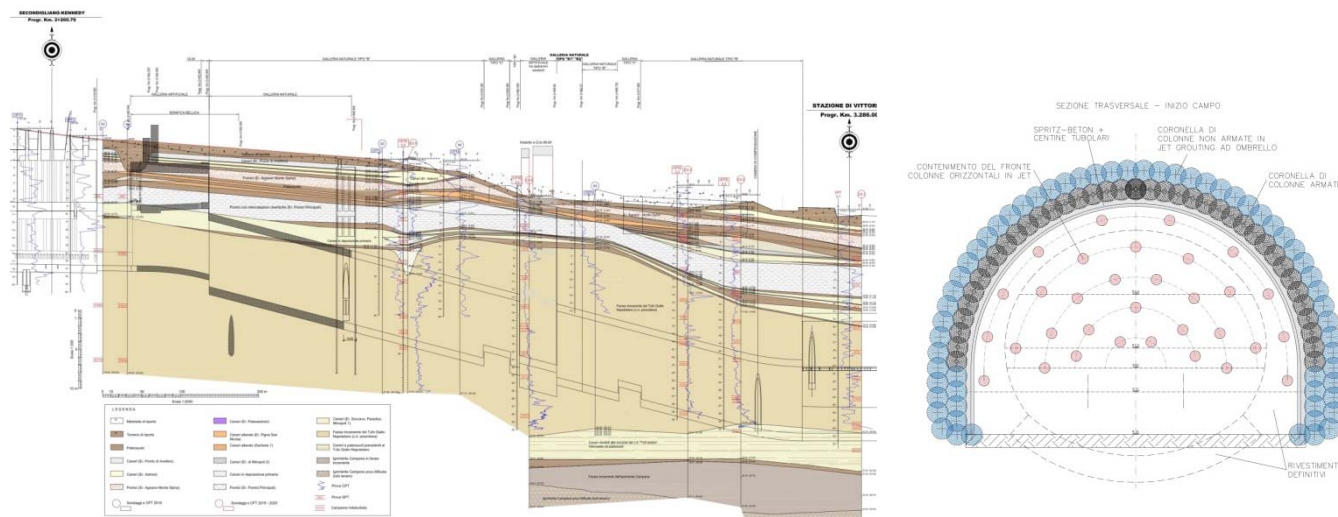


Figura 1. Sezione geologica con inquadramento planimetrico della galleria da realizzare (a sinistra). Sezione trasversale tipo, con dettaglio degli interventi di preconsolidamento (a destra).

Il numero e le tipologie di interferenze con gallerie acquedottistiche e collettori fognari, pile di viadotti e fondazioni di fabbricati – con fondazioni sia superficiali che profonde – influenza non solo il tracciato planimetrico ma anche le dimensioni dei campi di avanzamento e degli sfondi. L'attuale progetto esecutivo prevede sfondi di 1m su campi di avanzamento variabili tra i 4 ed i 7m, a seconda anche delle interferenze tra i sistemi di preconsolidamento al contorno e le fondazioni, talvolta indirette, dei manufatti superficiali.

2. DEFINIZIONE DEL LIVELLO DI ATTENZIONE PER I FABBRICATI SUPERFICIALI

Il livello di attenzione, la tipologia e la frequenza di monitoraggio a cui sottoporre ciascun fabbricato nelle fasi costruttive della galleria è stato definito sulla base della stabilità del nucleo al fronte in fase di avanzamento e della categoria di danneggiamento a cui si prevede che ciascun manufatto sarà soggetto durante gli scavi.

2.1 Definizione della categoria di danneggiamento con il Limiting Tensile Strain Method (LTSM)

Lungo lo sviluppo in pianta della galleria sono presenti un numero notevole di interferenze: individuando una fascia di larghezza all'incirca pari a due volte al diametro equivalente della galleria, a ridosso dell'asse, è possibile individuare un'area di interferenza. Al suo interno, in superficie, ricadono 19 fabbricati, con diverse tipologie strutturali e di fondazioni (edifici in c.a. e muratura, con fondazioni superficiali e profonde).

Ai fini della valutazione dell'impatto che lo scavo potrebbe avere su ciascuno dei manufatti superficiali sono stati innanzitutto valutati il cedimento massimo (in condizioni di campo libero) $s_{v,max}$ e la rotazione massima in fondazione θ_{max} . Le gaussiane delle subsidenze sono state stimate con il metodo semi-empirico di Peck & Schmidt [1969], ipotizzando dei valori di volume loss crescenti ($V_L/V_T = 0,5 \div 1,0\%$) ma comunque in un intervallo plausibile per scavi in tradizionale in terreni sciolti (facies incoerente del TGN, c.d. pozzolana) di origine vulcanica. Nei casi in cui $s_{v,max} \geq 10mm$ e/o $\theta_{max} \geq 1/500$ si è passati alla valutazione dello stato di danneggiamento. La categoria di danno (C.D.) a cui si prevede che sarà sottoposto ciascun fabbricato in fase di avanzamento è stato definito attraverso il LTS Method (Burland & Wroth [1974], Burland, Mair & Standing [2003]). Con questo metodo l'edificio viene assimilato ad una trave, con una rigidezza equivalente funzione delle sue dimensioni complessive e della tipologia strutturale, che si deforma seguendo la conca delle subsidenze determinate dallo scavo in condizioni di campo libero. La deformazione orizzontale totale ϵ_h ed il rapporto d'inflexione Δ/L della trave equivalente possono essere inseriti in un piano che li collega alla categoria di danno prevista, in funzione della geometria e tipologia strutturale. Nel seguito si riportano alcuni di questi grafici: gli edifici 104 e 119 sono dei fabbricati, rispettivamente in muratura e c.a., hanno altezze paragonabili (4 piani fuori terra) e per entrambi si prevede una categoria di danno 4/5 (da severa a molto severa secondo la classificazione di Burland & al.

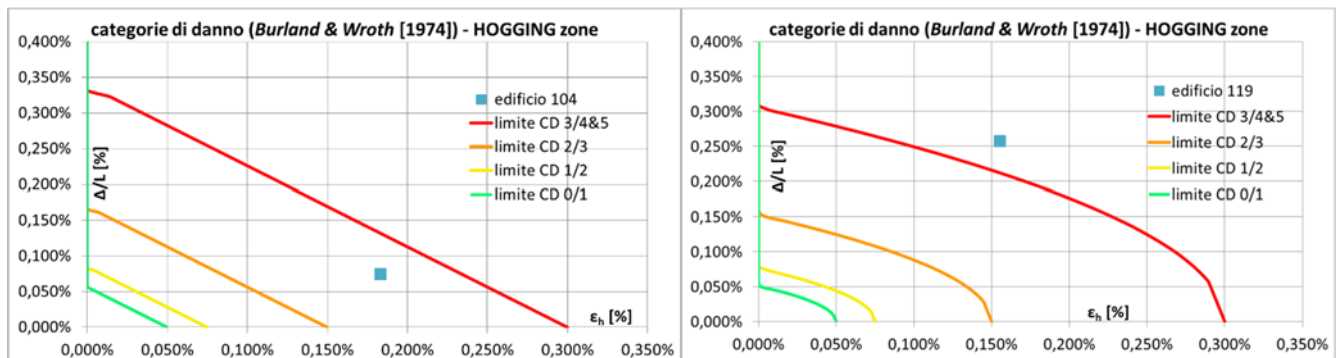


Figura 2. Definizione della categoria di danno prevista per gli edifici 104 e 119 attraverso il metodo di Burland & Wroth [1974].

2.2 Analisi della stabilità del fronte attraverso il metodo di Tamez

Dal punto di vista della stabilità del fronte, trattandosi di uno scavo in tradizionale con coperture molto basse, il metodo che si è ritenuto più opportuno per studiare questo aspetto è la procedura definita da Tamez [1985].

Secondo questa metodologia e nel caso in esame, i parametri da cui dipende la stabilità del fronte di scavo sono: dimensioni e la posizione del cavo (altezza, larghezza e ricoprimento), resistenza al taglio del terreno (definita, attraverso le condizioni di spinta, l'angolo d'attrito e la coesione, da resistenze allo scorrimento fittizie τ_{m2} e τ_{m3} lungo superfici prestabilite), caratteristiche di resistenza del volume di terreno consolidato al fronte, dimensioni dei campi di avanzamento e condizioni di carico superficiali. Di quest'ultima si è tenuto conto attraverso l'approssimazione di Boussinesq [1885]: pur non essendoci edifici che all'interno della fascia di interferenza, abbiano una fondazione ricadente esattamente sull'impronta dell'area di scavo, si è ritenuto di considerare la presenza dei fabbricati con un incremento di carico $\Delta\sigma_v$ in chiave ai rivestimenti definitivi. L'incremento di resistenza dei terreni al fronte, per effetto delle rotazioni è stata valutata con Peila [1994], ossia attraverso un incremento fittizio della coesione del volume di terreno da scavare, mentre la presenza dei presostegni e dei rivestimenti provvisori è stata contemplata attraverso l'applicazione di una contropressione.

Nel caso specifico il metodo di Tamez [1985] ha permesso di valutare F_s ed $F_{s,3}$, rispettivamente il fattore di sicurezza globale dell'intero meccanismo di rottura e del solo prisma di terreno non pre-rivestito (di ampiezza pari agli sfondi) in prossimità del fronte. In molti casi, le condizioni di stabilità ricadono nel campo della stabilità di breve termine ($1 < \min\{F_s; F_{s,3}\} \leq 2$): per attenuare il problema, una delle proposte ipotizzate in fase costruttiva è quella di incrementare il diametro delle rotazioni di presostegno, e ridurre le ampiezze degli sfondi.

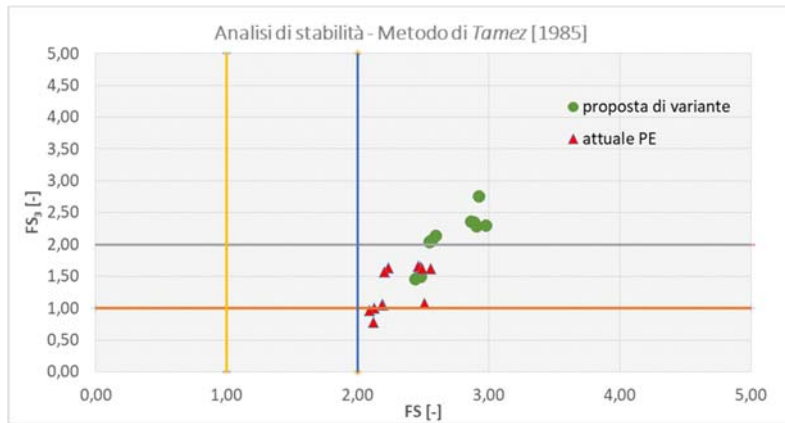


Figura 3. Fattori di stabilità del fronte (Tamez [1985]), nell'attuale progetto esecutivo (doppia coronale $D = 800\text{mm}$) e nel caso proposto in variante (singola coronella $D = 1200 - 1600\text{mm}$, con fondi $a = 1\text{m}$).

3. DEFINIZIONE DELLA CLASSE DI RISCHIO E DEL PIANO DEI MONITORAGGI

Alla luce di condizioni di stabilità del nucleo-fronte e della categoria di danno attesa, per ciascuno dei fabbricati ricadenti nella fascia di interferenza sono state definite delle *categorie di rischio*:

- **verde**: edifici soggetti ad un rischio basso, da monitorare con frequenza normale;
- **arancione**: edifici soggetti ad un rischio lieve, da monitorare con frequenza elevata;
- **rosso**: edifici soggetti ad un rischio elevato, da analizzare con modellazioni *FEM* accurate per la predisposizione di eventuali interventi di fondazione o presidi e monitorare con frequenza molto elevata.

Nella definizione di ciascuna di queste categorie, e quindi della tipologia e frequenza dei monitoraggi, sono state fondamentali le schede sinottiche nelle quali sono state sintetizzate:

- **schede A**: informazioni salienti sui fabbricati (tipologia strutturale e geometria) e esiti delle analisi di interferenza e di stabilità del fronte;
- **schede B**: informazioni sulla classificazione del rischio per ciascuno dei fabbricati e definizione della tipologia e frequenza dei monitoraggi.

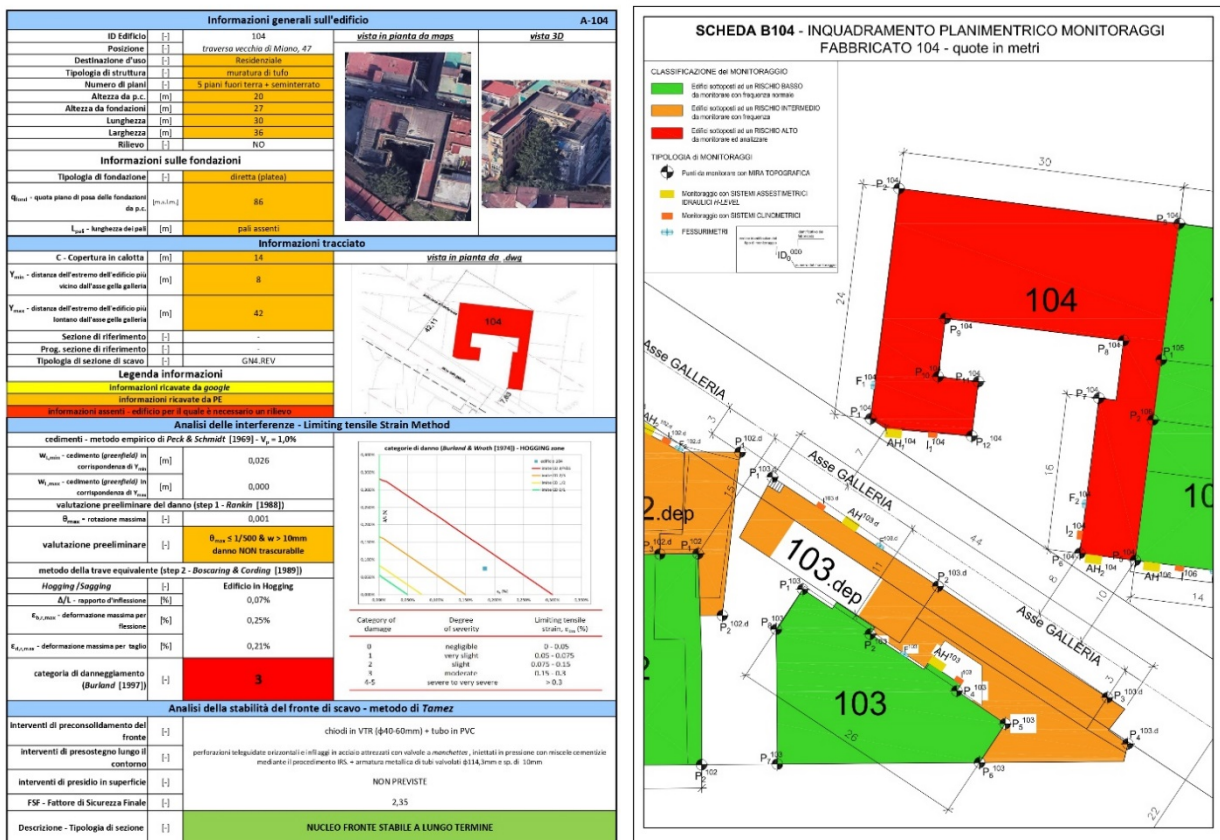


Figura 4. Schede sinottiche A (sinistra) e B (destra) per l'edificio 104.

3.1 Descrizione del piano di monitoraggio per i fabbricati

Definita la classe di rischio per colori, è stato possibile integrare il piano dei monitoraggi da effettuare per tutti i fabbricati. Come si evince anche dalla scheda B per il fabbricato 104 (che per tipologia ed importanza è quello maggiormente a rischio di danneggiamento, insieme all'edificio 119), il programma dei monitoraggi prevede la disposizione di assestimetri idraulici (tipo *H-Level*), clinometri biassiali, fessurimetri e punti di mira topografica.

Il piano dei monitoraggi prevede che il numero dei dispositivi di monitoraggio venga incrementato in corrispondenza dei fabbricati soggetti ad un rischio elevato (rossi in pianta). Un'ulteriore elaborazione utile dal punto di vista operativo, è il cronoprogramma dei monitoraggi, con il quale è stato possibile evidenziare la tipologia di monitoraggio nonché la frequenza delle letture per ciascun fabbricato nel corso dello scavo dell'intera tratta. Per gli edifici maggiormente a rischio, si prevede di effettuare ulteriori approfondimenti (analisi *FEM 3D*) ed eventualmente disporre delle opere di mitigazione, a seconda di quanto i risultati delle misure siano prossime ai valori di soglia definiti per i parametri caratteristici.



Figura 5. Planimetria tracciata con classificazione del rischio per i 19 fabbricati ricadenti nella fascia di interferenza.

4. CONCLUSIONI

In linea di principio il metodo di *Tamez* [1985] per l'analisi di stabilità del fronte di scavo e l'analisi di interazione terreno struttura con un metodo semi-accoppiato (tipo il metodo della trave equivalente) non forniscono risultati tra loro correlabili. Il primo infatti fornisce un fattore di sicurezza in condizioni *limite*, quindi di rottura e di instaurazione di un moto di scorrimento al fronte. La seconda, invece, definisce una condizione deformativa massima in corrispondenza delle fondazioni di un edificio nell'ipotesi in cui, sia il comportamento del fabbricato che del sottosuolo, siano perfettamente elastici.

Tuttavia, nel caso in esame, trattandosi di uno scavo molto superficiale, si può dire che sia le condizioni di stabilità del fronte che la categoria di danneggiamento attesa per un fabbricato, siano indici importanti per la definizione di un piano dei monitoraggi. Le schede sinottiche sono inoltre importanti strumenti che possono velocemente indirizzare la frequenza e la tipologia dei monitoraggi nonché interventi di mitigazione in corso d'opera.

5. BIBLIOGRAFIA

- Boussinesq M. J. [1885], *Applications des potentiels à l'étude de l'équilibre et de mouvement des solides élastiques*. Gauthier Villar, Paris.
- Burland, Mair & Standing [2003], *Ground performance and building response due to tunnelling*, Institution of Civil Engineers 2004.
- Burland J. B. & Wroth C. P. [1974], *Settlement of building and associated damage*. SOA Review. Conf. Settlement of Structures, Cambridge, Pentech Press, London, pp 611-654.
- Oreste P.P. [1998], *Analisi delle tecniche migliorative della funzione statica del fronte di scavo in galleria*. Tesi di post-dottorato. Politecnico di Torino.
- Peila D. [1994], *A theoretical study of reinforcement influence on the stability of tunnel face*. Geotechnical and Geological Engineering, 12, Chapman & Hall, London, pp. 145-168.
- Tamez E. [1985], *Estabilidad de túneles excavados en suelos*. Curso Victor Hardy 85. Mexico.