

ANALISI DI RISCHIO INDOTTO DALLO SCAVO DI GALLERIE SU EDIFICI E STRUTTURE NELL'AMBIENTE FORTEMENTE ANTROPIZZATO DELLE NUOVE METROPOLI INDIANE

Giuseppe M. Gaspari (gmg@geodata.it, giuseppegaspari@hotmail.com)
Geodata Engineering SpA – Torino

ABSTRACT. L'esperienza della progettazione delle linee metropolitane nel sottosuolo di alcune fra le maggiori città indiane, sta rappresentando una delle sfide più intense per l'ingegneria applicata alla sostenibilità dell'uso dello spazio sotterraneo in ambienti fortemente urbanizzati.

Nelle estese metropoli dei Paesi in via di sviluppo appartenenti al cosiddetto BRIC, infatti, la crescita spesso incontrollabile della popolazione determina una serie di problemi notevoli legati all'impossibilità di garantire un altrettanto rapido adeguamento dei servizi primari, dei quali il principale è certamente rappresentato dalla rete idrica e fognaria, ma non trascurabili sono anche i cavidotti per le utenze telefoniche ed elettriche, ormai irrinunciabili. Tutti questi servizi, in considerazione della fortissima antropizzazione dello spazio in superficie, devono logicamente essere collocati in sotterraneo, andando quindi ad interferire con gli scavi di realizzazione delle strutture di trasporto sotterranee, come le metropolitane. Sempre più, infatti, la qualità della vita in queste città risulta fortemente influenzata in negativo dall'inquinamento e dal traffico che ostacola anche un adeguato sviluppo commerciale ed industriale dell'economia locale.

Le grandi amministrazioni indiane, in particolare, stanno dando notevole importanza al problema dei trasporti pubblici e, grazie ai crescenti finanziamenti ed alla nascita di una cultura estetica rispettosa del paesaggio urbano, sempre più la scelta va ricadendo su sistemi integrati in sotterraneo piuttosto che su invadenti strutture sospese dall'impatto assai più problematico.

Tuttavia, la scelta di ospitare sistemi di trasporto sotto il piano campagna richiede uno studio sempre più tecnologicamente avanzato per determinare quale sia il reale impatto di tali strutture su edifici ed opere pre-esistenti, ancor più se ci si trova in aree storicamente ed architettonicamente da preservare, di pregio turistico o, ancora, culturalmente e socialmente vibranti. Tutti questi aspetti sono stati riscontrati e affrontati per il progetto della linea UG-1 della Metro di Bangalore.

1. Introduzione

Il tracciato della nuova linea metropolitana sotterranea UG-1 di Bangalore attraversa la città da Nord a Sud e si innesta ai due estremi con la linea in elevazione mentre al centro lo snodo della Stazione Majestic la collega alla linea Est-Ovest denominata UG-2. Entrambe le linee sono al momento (Maggio 2013) in costruzione e non è possibile esibire dati di monitoraggio in grado di consentire un'adeguata back-analisi dei calcoli effettuati in fase di progetto.

E' tuttavia interessante in questo articolo descrivere la metodologia applicata, che fa riferimento ad alcuni fra i più recenti sviluppi nel campo della modellazione degli effetti prodotti su strutture pre-esistenti dallo scavo di stazioni in cut&cover o di tunnel con metodo meccanizzato. L'applicazione è stata effettuata non solo su edifici privati e commerciali, ma anche su palazzi storici e strutture di pubblica utilità come fly-over e ospedali.

In considerazione dell'impossibilità di intervenire attraverso consolidamenti da piano campagna, un appropriato risk management plan è stato sviluppato al fine di garantire la stabilità sia dello scavo sia delle pre-esistenze in modo da salvaguardare la sicurezza tanto degli operatori quanto degli abitanti. Diversi livelli di rischio sono stati associati diverse tipologie di intervento, includendo l'evacuazione come ultima istanza e facendo ricorso, quando necessario, ad un monitoraggio real time.

2. Le cause e gli effetti degli scavi in sotterraneo in ambiente urbano

La subsidenza è il risultato di una complessa interazione di fenomeni, tutti volti a provocare un abbassamento della superficie (Figura 1). Per questo motivo, l'impostazione della progettazione deve essere orientata al controllo delle deformazioni del terreno, sia per limitare la subsidenza di superficie, sia per ottimizzare gli interventi di sostegno nelle varie fasi della costruzione. La necessità del controllo delle subsidenze deve essere orientata a rispettare alcuni vincoli, come di seguito riassumibili:

1. evitare il danneggiamento delle infrastrutture e degli edifici in superficie;
2. garantire la sicurezza dei lavoratori in tutte le fasi di lavoro;

3. controllare l'incremento delle sollecitazioni nel rivestimento provvisorio che può risultare dal decadimento dei parametri di resistenza dei terreni, da carichi asimmetrici (dovuti alla geomorfologia, in prossimità di un'altra cavità), ed eterogeneità del terreno;
4. evitare l'innescò e la ri-mobilizzazione di fenomeni di instabilità di versante.

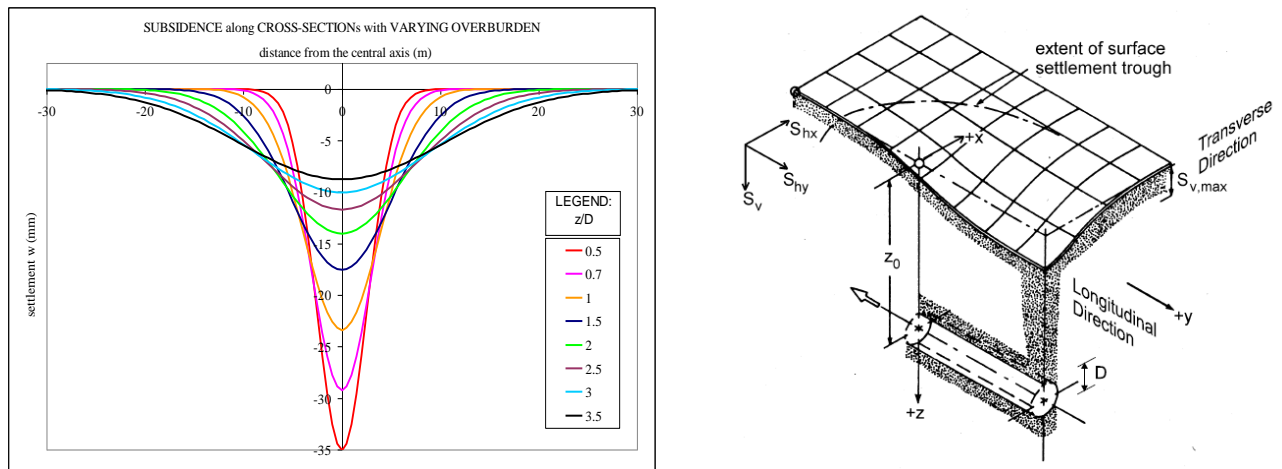


Figura 8: Rappresentazione grafica della conca di subsidenza in corrispondenza di un tunnel superficiale.

Per definire in particolare il livello di interferenza fra lo scavo di una galleria e le strutture e i servizi presenti in superficie o in sotterraneo, è necessario, da un lato, valutare la subsidenza indotta e, dall'altro, definire i valori del cedimento ammissibile in relazione alla tipologia ed alla finalità d'uso dell'opera interessata dal movimento.

Oltre ai movimenti locali e immediati dovuti alla rottura dell'equilibrio naturale con l'apertura di superfici di discontinuità presenti nelle formazioni rocciose, esistono movimenti "generalì" legati alle caratteristiche dei terreni e all'interazione tra il suolo ed il rivestimento. Questi ultimi, più facilmente quantificabili, sono altresì attribuibili alle seguenti cause:

- abbassamento della falda acquifera, con conseguente cessazione della spinta idrostatica sugli strati di copertura e innescò, nel caso di processi di consolidazione;
- "perdita di terreno", conseguente allo scavo, a cui fa seguito una redistribuzione delle pressioni nel suolo sia esso una formazione rocciosa o un terreno;
- comportamento viscoso della formazione di copertura (fenomeno chiaramente reologico).

3. I metodi di previsione dei cedimenti indotti dallo scavo in sotterraneo

La previsione degli abbassamenti superficiali del terreno a seguito dello scavo di gallerie metropolitane è stata sinora permessa, più che altro, dalle diverse esperienze dei progettisti e dalle formulazioni teoriche prodotte da ricercatori che hanno correlato una grande molteplicità di dati provenienti da diversi cantieri in diverse parti del mondo, raccolti per omogeneità strutturali e geologiche.

Di qui l'interesse con il quale oggi si guarda a metodi di calcolo di previsione che utilizzino dati oggettivi, facilmente misurabili e correlabili, da un lato, con il tipo e le modalità di scavo, dall'altro, con le caratteristiche geologiche, idrogeologiche e geotecniche delle formazioni attraversate. Solo così è scientificamente accettabile una previsione dei cedimenti a giorno da cui può derivare una obiettiva previsione dei danni alle strutture preesistenti.

In base a quanto è stato detto a riguardo dei fenomeni di subsidenza, durante la realizzazione di un'opera in sotterraneo occorrerà considerare i seguenti punti:

1. valutazione dell'origine dei movimenti nel terreno;
2. determinazione della ripartizione spaziale degli spostamenti;
3. rilevazione dell'evoluzione del bacino di subsidenza;
4. correlazione dei cedimenti con la deformazione delle fondazioni interessate;
5. formulazione di criteri di danneggiamento delle opere.

Finora si è soprattutto tentato di ottenere correlazioni dirette fra gli abbassamenti misurati in superficie e gli avanzamenti degli scavi nel sottosuolo. Ciò ha richiesto semplici osservazioni, in superficie, degli effetti a lungo termine, osservazioni che poco hanno rivelato circa lo sviluppo meccanico del fenomeno. Ben più significative si sono invece dimostrate le campagne di misure

(spostamenti nel terreno) condotte già nell'immediato intorno dello scavo: tali misurazioni hanno permesso uno studio completo tridimensionale del movimento ed è sulla base di esse che può essere tentata un'indagine più generale del fenomeno della subsidenza e della prevenzione, in vista di sue dannose conseguenze.

I principali metodi di valutazione della subsidenza sono elencati e brevemente descritti di seguito.

Metodi fisici

Sono basati sull'impiego di modelli di laboratorio ai fini dello studio in similitudine completa del fenomeno fisico. Questi modelli presentano i notevoli svantaggi della costruzione del modello fisico, della necessaria lentezza di esecuzione delle prove (se si vuole operare in similitudine completa) e delle difficoltà di ottenere quantificazioni precise (Sauer et al,1978;Sharma 1975; Hudson et al.1976).

Studi stocastici

Questi metodi sono basati sulla analogia, riscontrata in più casi, fra sezioni massime del bacino di subsidenza e curve di distribuzione probabilistiche, per esempio di tipo gaussiano. Lo svantaggio principale deriva dal fatto che è difficile tenere preventivamente conto di grandezze variabili (come la coesione e l'angolo di attrito del terreno) che influenzano molto il fenomeno della subsidenza. La base del metodo si riduce praticamente ad un semplice bilancio fra il volume di terreno abbassato (volume di subsidenza) ed il volume di terreno sovra-scavato durante l'avanzamento delle macchine (volume perso), tenuto conto della profondità "z" alla quale è posto il tunnel. Si tratta tuttavia di un procedimento molto speditivo (Myriantthis 1974; Peck 1969, Attewell et al.,1975; Botti 1974), seppur particolarmente utile per una semplice stima di massima dei cedimenti attesi.

Metodi analitici

Questi metodi permettono di determinare lo spostamento radiale in un mezzo omogeneo non pesante, infinito, a comportamento prevalentemente elastico e sottoposto ad uno stato tensionale geostatico di tipo isotropo. Essi consentono di definire unicamente l'ordine di grandezza dello spostamento finale in corrispondenza dell'asse della galleria ma esistono recenti correlazioni in grado di tener conto di differenti comportamenti plastici e reologici del suolo.

Metodi numerici

Sono questi i metodi ad oggi in più rapida ascesa vista la sempre maggiore facilità nell'uso dei software dedicati e la rapidità con cui i moderni processori riescono a fornire le soluzioni. E' notevole, inoltre, tener conto dell'estrema flessibilità dei vari metodi implementati: ad esempio, il metodo ad elementi finiti permette di svolgere il problema sotto svariate ipotesi sia per il terreno (mezzo elastico, plastico, viscoso, ecc) sia per i carichi (peso proprio della copertura, azione delle fondazioni vicine, ecc) (Attewell et al., 1975; Chisari et al., 1977; Evangelista et al., 1971; Barla et al., 1974; Sagaseta et al., 1974). Anche le differenze finite consentono una applicazione estremamente adatta a varie situazioni, tanto più che è possibile facilmente implementare leggi costitutive anche altamente specializzate.

Metodi empirici

Si tratta in questo caso della elaborazione di una popolazione sufficientemente vasta di dati empirici in casi pratici di subsidenza, a seguito di scavi in condizioni omogenee, per le diverse situazioni, quali il tipo di terreno, la posizione della falda o i metodi di avanzamento (Cording et al., 1977; Schultz 1975; Hudson et al., 1976; Botti 1972; Oteo et al., 1979).

4. Lo studio degli effetti delle conche di subsidenza sulle pre-esistenze

Una volta identificata l'area di terreno, sopra la galleria che è sottoposta a movimenti significativi di massa, la stima degli effetti che i cedimenti hanno sulle strutture presenti viene normalmente ricondotta allo studio di alcuni parametri fondamentali quali la distorsione angolare (o rotazione relativa) del terreno (e quindi delle fondazioni) ed il valore assoluto del cedimento massimo.

Il calcolo della distorsione angolare massima, mostrato in Figura 2, si basa sulla lunghezza tipica degli edifici, ossia la distanza tra due plinti o la lunghezza della trave di fondazione, e sulla massima

pendenza del profilo del cedimento. I valori ottenuti devono essere confrontati con i relativi valori ammissibili imposti da capitolato o, qualora non ci fossero prescrizioni specifiche, con i valori consigliati dalla letteratura (esempio di Tabella 1). Nel caso in cui i valori di previsione fossero superiori ai limiti consentiti, occorre in fase di progetto, prevedere ulteriori interventi di contenimento che permettano un più efficace controllo delle perdite di terreno. In base ai valori di copertura e di distanza dall'asse della galleria, ed in funzione del valore della perdita di terreno, i manufatti così censiti e studiati vengono poi normalmente suddivisi in classi omogenee di interferenza in modo da gestirne più facilmente gli interventi di consolidamento e salvaguardia.

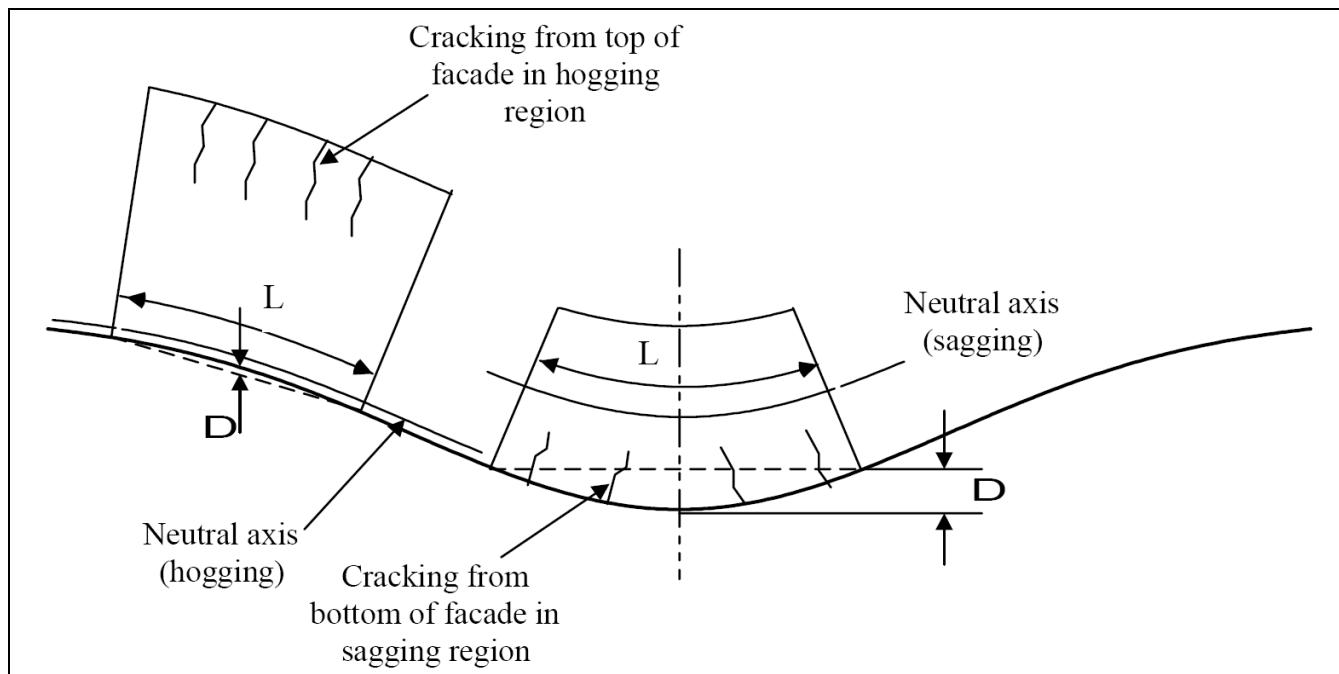


Figura 2: Idealizzazione di edifici come travi elastiche e rappresentazione della deflessione relativa D .

Degree of Damage	Description of typical damage (ease of repair)	Approximate crack width (mm) (Burland <i>et al.</i> , 1977)	Limiting tensile strain (%) (Boscardin and Cording, 1989)
0 Negligible	Hairline cracks of less than about 0.1mm are classed as negligible	< 0.1	0.0 – 0.05
1 Very slight	Fine cracks which can easily be treated during normal decoration	1	0.05 – 0.075
2 Slight	Cracks easily filled. Re-decoration probably required. Some repointing may be required externally	5	0.075 – 0.15
3 Moderate	The cracks require some opening up and can be patched by a mason. Recurrent cracks can be masked by suitable linings. Repointing of external brickwork and possibly a small amount of brickwork to be replaced.	5 – 15 or a number of cracks > 3	0.15 – 0.3
4 Severe	Extensive repair work involving breaking-out and replacing sections of walls, especially over doors and windows.	15 – 25 but depends on number of cracks	>0.3
5 Very severe	This requires a major repair job involving partial or complete rebuilding.	> 25 but depends on number of cracks	

Tabella 1: Valori di soglia adottati normalmente in base ai riferimenti degli specifici capitolati.

5. La metodologia di analisi ed il Risk Management Plan

Durante la fase di costruzione di tunnel metropolitani, il maggiore impatto atteso è riferito ai possibili spostamenti del terreno causati dagli scavi. L'approccio al problema si sviluppa a partire dalla necessità di calibrare l'approfondimento delle analisi in funzione di una variabile fondamentale: l'entità dei cedimenti attesi. Per ogni struttura analizzata, devono dunque essere eseguiti degli studi preliminari, per acquisire tutte le informazioni necessarie, tra cui: geologia specifica del sottosuolo, tipologia e dimensioni delle fondazioni, geometria della struttura, proprietà dei materiali, presenza di elementi di pregio, evoluzione storica del fabbricato, condizioni statiche attuali.

La procedura per lo studio del Building Risk Assessment

Dopo un'accurata valutazione dei dati di input a disposizione, in considerazione anche della difficile correlazione degli stessi con le effettive condizioni precarie di molte strutture, è necessario procedere in prima fase ad una valutazione degli effetti dei cedimenti di campo libero: sono molte le formulazioni esistenti in letteratura al riguardo, ma certamente la più aggiornata è data da Burland, 2004, includendo i risultati di Boscarding e Cording, 1998.

Nei casi in cui gli effetti attesi mostrino la necessità di un approfondimento, è di fondamentale importanza tener conto dell'effetto di interazione terreno-struttura, in modo da ricavare, attraverso specifiche modellazioni numeriche, nuovi campi di spostamento del terreno e poter eseguire appropriate analisi strutturali in grado di tener conto del benefico effetto legato alla rigidità della fondazione. Il risultato è un giudizio sul danno strutturale atteso ed è basato sul valore massimo della deformazione di trazione ε e sulla massima differenza relativa fra i cedimenti, D .

E' opportuna l'introduzione questi studi di un fattore riduttivo dei limiti che separano le categorie di danno atteso: l'Indice di vulnerabilità è stato proposto e verificato su diversi progetti in ambito urbano ed è basato sulla valutazione delle effettive condizioni di danneggiamento della struttura in esame, della sua maggiore o minore importanza strategica, della posizione relativa rispetto ai tunnel e delle proprietà geo-meccaniche dei terreni nell'area di influenza del tunnel e della fondazione.

Il prodotto finale dell'analisi del danno atteso sugli edifici e le strutture sotto-atteverati dagli scavi per la costruzione di servizi sotterranei consiste in un report specifico che evidenzia per ogni elemento studiato il rischio in caso di assenza di interventi e prevede, in funzione dei dati di monitoraggio ricavati all'avanzare dello scavo, azioni tese a limitare i danni su cose e persone.

L'approccio multifasico per la predizione degli effetti dei cedimenti indotti dagli scavi urbani

L'approccio al BRA, come accennato nei paragrafi precedenti, deve essere strutturato attraverso tre distinti livelli di approfondimento, via via più precisi e dettagliati man mano che si evidenzia un rischio crescente per la stabilità della struttura presa in esame.

Fase 1 - Analisi preliminare: In questa prima fase, vengono studiati i cedimenti in condizioni di campo libero e successivamente rappresentate sulla reale topografia della città le curve di livello che rappresentano le subsidenze attese conseguenti lo scavo delle opere sotterranee. Si adottano comunemente formule di derivazione empirica che rappresentano molto fedelmente la conca di subsidenza trasversale attraverso la formulazione di una curva gaussiana: l'individuazione dei parametri rappresentativi della forma stessa di tale curva sono il massimo cedimento atteso, " S_{max} " e la posizione del punto di flesso "i", rispettivamente legati al volume perso V_{max} registrato dallo scavo meccanizzato e al parametro "k" rappresentativo della geologia attraversata. Ovviamente, le caratteristiche geometriche del tunnel, fundamentalmente rappresentate dal diametro di scavo "D", e la profondità "z" dell'asse della galleria rivestono importanza imprescindibile per la determinazione rispettivamente del volume perso atteso e dell'effetto sulla forma della gaussiana.

Fase 2 - Approfondimento di dettaglio: Tutte le strutture pre-esistenti, che ricadano all'interno della fascia dei cedimenti maggiori di 10mm o di quella ove la pendenza della conca di subsidenza sia maggiore di 1/500, sono soggette a questa seconda fase di approfondimento poiché le esperienze storicamente registrate di scavi in ambiente urbano non consentono di trascurare l'effetto degli scavi sulle fondazioni e conseguentemente il danno che è possibile indurre alla porzione in elevazione. In questo step viene calcolato il massimo sforzo di trazione registrato a livello della fondazione dell'edificio e viene corrispondentemente assegnata una categoria di danno atteso attraverso tabelle e grafici costruiti per lo specifico edificio in base alle indicazioni di letteratura (Burland 2004, Boscarding e Cording, 1998 tra i più utilizzati comunemente) che si rifanno ad un'approssimazione della struttura come fosse una trave studiata alla Timoshenko. In particolare, nelle applicazioni cui questo lavoro fa

riferimento, è stato deciso di adottare la variazione con la profondità del parametro k in base alle formulazioni di Moh, Ju e Hwang del 1998. Nel caso di palazzi in prossimità di scavi cielo aperto, la teoria cui ci si riconduce fu formulata originariamente da Peck, Clough e O'Rourke, ma in questa sede sono state applicate le correzioni apportate da Hsieh e Ou nel 1998.

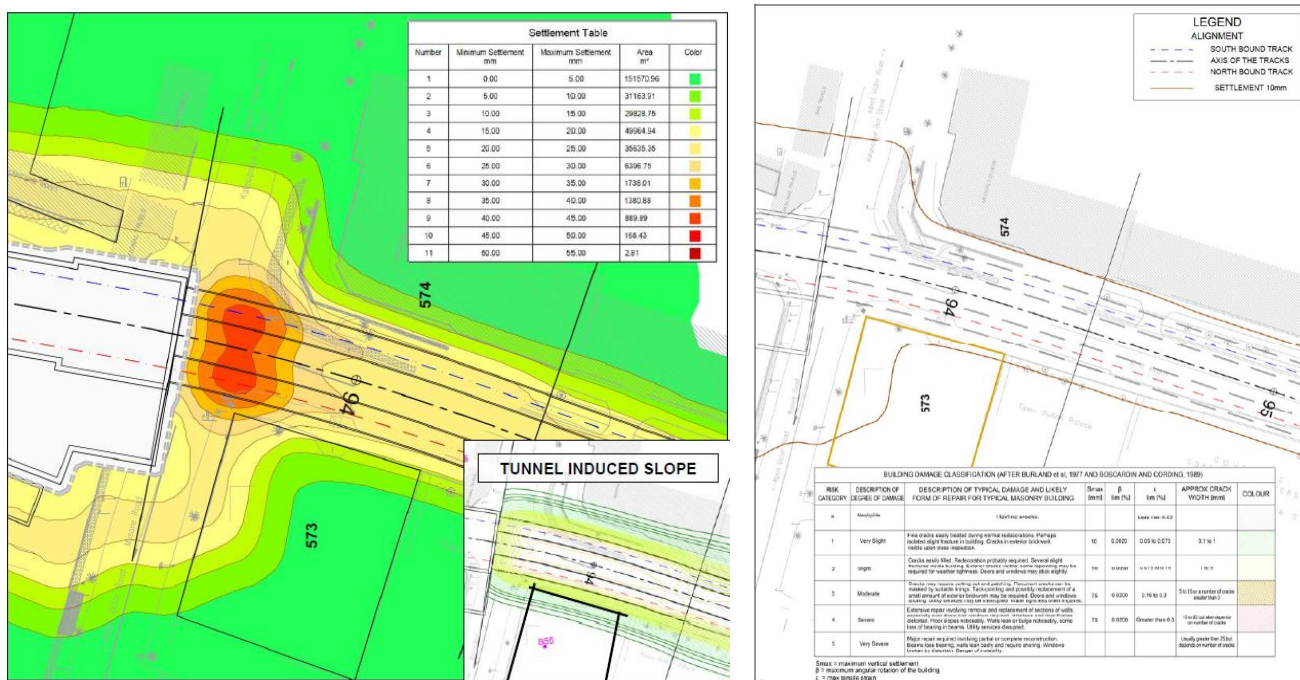


Figura 3: Esempio del risultato delle Fasi 1 e 2 applicate ad un caso di studio della Metro di Bangalore.

Fase 3 - Valutazione specifica: Laddove le strutture studiate nella fase precedente, ricadano in una categoria di danno attesa pari o superiore al livello 3 - moderato, risulta necessario studiare con accuratezza l'effetto precedentemente trascurato dell'interazione fra terreno e fondazione, tenendo conto delle relative rigidzze e del conseguente effetto benefico legato ad una deformazione più uniforme grazie alla presenza del "solido equivalente" che, con legge costitutiva semplificata di tipo elastico lineare, modella la struttura in elevazione. In questa fase, per quanto con un approccio semplificato attraverso una modellazione numerica bidimensionale ad elementi finiti, laddove consentito dall'orientamento relativo delle gallerie rispetto all'edificio, si tiene conto del reale comportamento elasto-plastico del terreno, dell'effetto tridimensionale dello scavo e della dimensione in profondità dell'edificio attraverso lo "stress reduction method" e una variazione di rigidzza della fondazione che simuli l'edificio stesso. In questo caso, il risultato in termini di categoria di danno assegnata risulta molto meno cautelativo di quelli delle fasi precedenti: ne consegue, di solito, una riduzione della categoria di danno e di conseguenza un approccio più realistico e produttivo per determinare le soluzioni destinate a preservare l'integrità statica delle strutture esaminate. Le analisi di interazione terreno-struttura sono tuttavia caratterizzate da un elevato onere computazionale e devono essere approfondite caso per caso in modo specifico: in alcuni casi è anche necessario ricorrere a modellazioni di tipo tridimensionale in considerazione dell'impossibilità di identificare con modelli "plane-strain" delle sottostrutture in grado di rappresentare, in termini di rigidzza e resistenza equivalenti, l'effetto statico e cinematico dell'intero edificio.

Fase 4 – Analisi strutturale: L'ultima fase dell'approccio allo studio in fase progettuale degli effetti indotti dallo scavo dei tunnel in zone urbane consiste, se possibile, in un'analisi strutturale dell'edificio stesso attraverso l'esame dei singoli elementi che lo compongono e degli effetti su di essi delle deformazioni attese a livello delle fondazioni. Anche la concavità o convessità (di solito denominate con i termini *sagging* e *hogging*) della deformata alla base causata dai cedimenti rappresenta una importante discriminante in termini di effetti strutturali. Pertanto le diverse strutture da esaminare possono essere studiate in modo da avere un livello di conoscenza adeguato, che però richiede accurate informazioni sui carichi trasferiti dai vari elementi, sulle loro effettive condizioni, sui materiali impiegati e sulle armature effettivamente presenti. Si tratta di un livello di dettaglio che difficilmente può essere raggiunto vista la difficile reperibilità di dati corretti e coerenti fra loro. Infatti, i rilievi incontrano sempre limitazioni, per esigenze d'uso dell'opera e difficoltà nel reperire informazioni dai costruttori e dai progettisti; inoltre, in particolare nei Paesi in via di sviluppo, i mezzi di indagine non distruttivi non

sono facilmente disponibili e quelli impiegati, in ogni caso, non sono in grado di fornire dati utili sulle proprietà meccaniche dei materiali. Lo stato deformativo esistente è poi difficilmente valutabile ed ancor più complessa risulta la valutazione del suo effetto sulla vulnerabilità della costruzione stessa ed il giudizio sulla accettabilità degli effetti dello scavo.

Ne consegue la necessità di individuare un sistema di protezione adeguato per tutti gli edifici che dopo lo studio di fase 3 ricadano ancora in categoria di danno moderata o superiore e per i quali non sia possibile rientrare ad un livello di rischio accettabile con interventi di consolidamento del suolo. E' qui, dunque, che riveste un ruolo di primaria importanza l'organizzazione di un appropriato piano di monitoraggio dello scavo, dell'edificio stesso e del terreno sia al piano campagna sia in profondità. Vengono in questa sede definiti e ottimizzati gli strumenti nella loro tipologia, posizionamento e frequenza di lettura in funzione del raggiungimento di tre distinti livelli di guardia: valori di progetto, di attenzione e di allarme. Tali livelli sono definiti come percentuali del valore registrato in fase di progettazione dai calcoli e consentono di organizzare coerentemente un piano di evacuazione e sostegni temporanei in grado di sostenere la struttura e preservare l'incolumità degli abitanti.

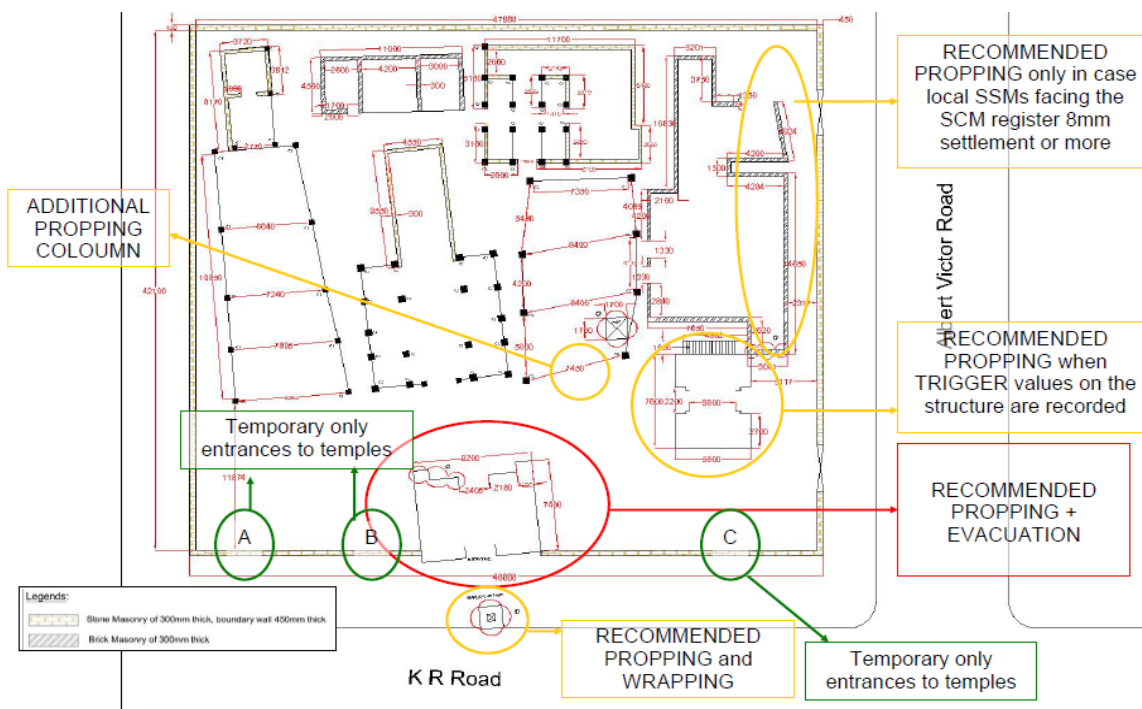


Figura 4: Esempio del risultato delle Fasi 3 e 4 applicate al medesimo caso di studio della Metro di Bangalore.

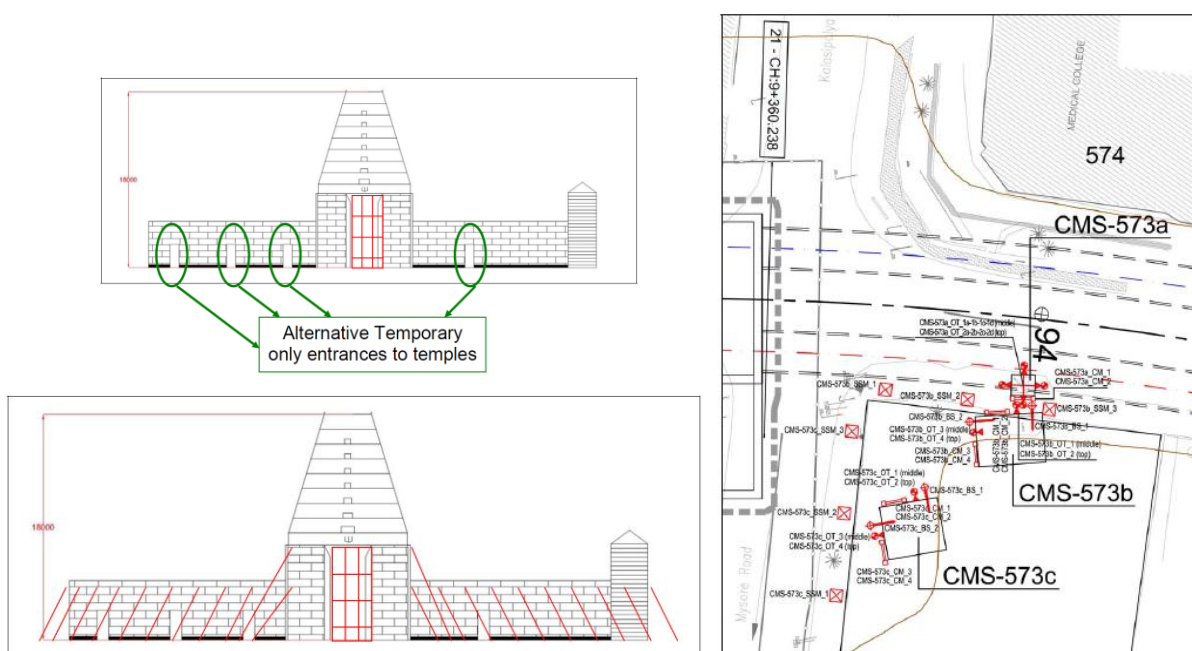


Figura 5: Esempio di interventi di sostegno e monitoraggio e di definizione dello schema di evacuazione.

6. Conclusioni

La realizzazione di gallerie metropolitane produce inevitabilmente un'alterazione dello stato tensio-deformativo del terreno. L'effetto si risente al livello del piano campagna in modo tanto più sensibile quanto più superficiali sono le gallerie stesse: lo scavo e le modalità con cui questo viene effettuato producono lo sviluppo di cedimenti che si propagano anche a grandi distanze e possono avere un impatto a volte anche catastrofico con l'ambiente urbano.

La valutazione dell'impatto della realizzazione di gallerie metropolitane sulle strutture sovrastanti rappresenta quindi un passo cruciale del percorso progettuale, in particolare nelle aree caoticamente urbanizzate ed intensamente antropizzate delle nuove metropoli dei Paesi in via di sviluppo. Fra questi, soprattutto l'India appare particolarmente attenta a non creare squilibri sociali in un ambiente estremamente vario in cui, all'interno di limitatissimi spazi, coesistono religioni, culture e tradizioni profondamente diverse e radicate nei millenni di storia del subcontinente.

Conseguentemente, è importante valutare i potenziali danni indotti, in modo da prevedere, con una mirata azione di monitoraggio, adeguati interventi di mitigazione e salvaguardia. E' infatti oggi possibile ricorrere alle soluzioni più innovative offerte dallo sviluppo delle tecniche di miglioramento e rinforzo delle caratteristiche meccaniche dei terreni. Nel contempo, o in alternativa, è spesso necessario avvalersi dei consueti metodi di consolidamento strutturale in uso ormai da diversi anni per il restauro degli edifici più antichi. Questo aspetto della progettazione assume una particolare valenza in presenza di infrastrutture strategiche, in particolare quelle di trasporto visto il traffico che attanaglia le città indiane, e di monumenti di eccezionale valore storico ed archeologico, spesso sottoposti dalle soprintendenze a rigidi vincoli di tutela ambientale e artistica, che richiedono particolare cautela nella previsione dei suddetti movimenti del terreno.

E' questo il campo di applicazione di una metodologia insieme innovativa e standardizzata che consenta di dotarsi di strumenti flessibili in grado di garantire la salvaguardia degli edifici pre-esistenti lo scavo delle nuove metropolitane e la sicurezza dei lavoratori e degli abitanti.

7. Bibliografia

- Boscardin, M D. and Cording, E. J. (1998) Building response to excavation-induced settlements. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No. 1, January, 1989, pp 1-21.
- Burland, J. B., Mair R. J., Standing J. R. (2004) Ground performance and building response due to tunnelling. *The Skempton Conference, 2004, London*, pp 291-342.
- Guglielmetti V., Grasso P. G., Xu S. (2007) *Mechanized Tunnelling in Urban Areas*. Taylor & Francis.
- Hsieh, P.-Go and Ou, C.-Yu (1998) Shape of ground surface settlement profiles caused by excavations. *Canadian Geotechnical Journal* Vol: 35, pp 1004-1017.
- Moh, Z. C., Ju, D. H. and Hwang, R. N. (1998) Ground movements around tunnels in soft grounds. *Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, April 15-17, 1996, London*, pp. 267-274.

Ringraziamenti

Si ringraziano in particolare, per il diretto coinvolgimento nell'applicazione della metodologia sopra descritta al progetto UG-1 della metro di Bangalore, i colleghi P. Muniyappa, E. Nuzzo, G. Quaglio e G. Zanfardino del settore TUNG della Geodata Engineering, F. Tiengo e D. Vercellino del settore INFRA, i direttori tecnici G. Astore e M. Pescara ed il Project Manager della commessa "metro Bangalore" B. Fradin.

Si ricordano poi l'azienda municipalizzata di trasporto urbano "Bangalore Metro Rail Corporation Limited" (BMRCL), il "General Consultant" e l'impresa affidataria della costruzione "chiavi in mano" della Metro UG-1 di Bangalore, "Coastal Projects LTD - Transtonnelstroy Joint Venture". Infine, si ringraziano l'Ing. N.P. Sharma (Chief Engineer – BMRCL), l'Ing. Nigel Butterfield (Project Manager – UG section - GC) e l'Ing. K. Raghavendra Rao (Vice President – Technical – COASTAL-TTS JV.).