GALLERIE e GRANDI OPERE SOTTERRANEE

Produttività e sicurezza nello scavo convenzionale di gallerie: il valore aggiunto dell'avanzamento a piena sezione

P. Lunardi[a], R. Bindi[b*], C.L. Zenti[b]

[a]*Studio di progettazione Lunardi, Milano, Italia*
[b]*Rocksoil S.p.A., Milano, Italia*

Sommario

I cantieri sotterranei, minerari o per opere civili, sono luoghi di lavoro tra i più complessi da gestire dal punto di vista della sicurezza strutturale e operativa, nonché della certezza delle produzioni, se non altro perché si deve operare in un ambiente naturale (il sottosuolo), assai insidioso e spesso poco conosciuto. L'importante diffusione dello scavo meccanizzato avvenuta negli ultimi anni grazie ai progressi tecnologici conseguiti in fatto di TBM, ha migliorato notevolmente la sicurezza degli scavi in galleria, ma l'avanzamento in convenzionale rimane in molte situazioni l'unica scelta possibile. Da qui l'importanza di garantire elevati standard di sicurezza del lavoro anche in queste situazioni. L'approccio dello scavo convenzionale a piena sezione attuato anche nei terreni e nelle situazioni tenso-deformative più difficili, come proposto per la prima volta nel 1988 dal prof. ing. Pietro Lunardi (approccio ADECO-RS), ritrovando nello scavo convenzionale le medesime caratteristiche alle quali lo scavo meccanizzato deve il proprio successo, permette la realizzazione di cantieri particolarmente sicuri ed efficienti, a fronte dell'impiego di un numero di operatori al fronte eccezionalmente ridotto e di conseguenza consente, meglio degli approcci a sezione parzializzata, di garantire l'affidabilità delle produzioni e la sicurezza delle maestranze anche nelle condizioni tenso-deformative più difficili. In tema di sicurezza dei cantieri un ruolo chiave è svolto anche dalla qualità delle normative di riferimento disponibili. Sulla base delle esperienze progressivamente maturate nel corso degli ultimi venticinque anni, durante la costruzione di alcune centinaia di chilometri di gallerie realizzate in scavo convenzionale a piena sezione nelle più diverse condizioni tenso-deformative, in Italia si sono messe a punto le NIR (*Note InterRegionali d'ingegneria della sicurezza nello scavo di gallerie*), che hanno contribuito significativamente ad elevare il livello di sicurezza dell'intero processo costruttivo delle opere in sotterraneo realizzate mediante scavo in convenzionale riducendone significativamente i rischi.

*corresponding author

e-mail e contatti del corresponding author: renzo.bindi@rocksoil.com

Parole chiave: Scavo convenzionale a piena sezione, scavo a sezione parzializzata, ADECO-RS, NATM, salute, sicurezza, NIR, infortuni

Keywords: Full face conventional excavation, sequential excavation, ADECO-RS, NATM, health, safety, NIR, accidents

1. Introduzione

La realizzazione di grandi opere infrastrutturali comporta sempre un certo grado di rischio sia per l'integrità a breve e a lungo termine delle opere stesse, sia per il possibile verificarsi di situazioni

impreviste o imprevedibili tali da ostacolare il regolare svolgimento delle lavorazioni, sia, infine, per la sicurezza delle maestranze più esposte durante i lavori di costruzione. Questi rischi, se ben gestiti sin dalla fase progettuale fino al completamento e poi anche durante la vita delle opere possono essere fortemente mitigati e quasi annullati. Ciò è vero anche per le opere in sotterraneo, ove la gestione del rischio si presenta particolarmente complessa, se non altro perché ci si trova ad operare in un ambiente naturale (il sottosuolo), insidioso e spesso non sufficientemente conosciuto, anche spingendo nel dettaglio le indagini propedeutiche al progetto e quelle in corso d'opera [1].

Improvvise e violente venute d'acqua e/o di gas nelle aree di lavoro, frane più o meno importanti (camini di collasso, fornelli, ecc.), distacchi progressivi o violente proiezioni di porzioni di roccia (*rock burst*) sono tra i pericoli più comuni e noti dei cantieri in sotterraneo, cui si aggiungono però altri fattori che condizionano in particolare la sicurezza delle attività presso i fronti di scavo, ad esempio:

- l'unicità della via di fuga, che tra l'altro può trovarsi parzialmente ingombra di mezzi d'opera, impianti, materiali e attrezzature;
- gli spazi operativi, spesso limitati in relazione alle dimensioni delle macchine operatrici e degli impianti, alle manovre dei mezzi d'opera, al trasporto di materiali e attrezzature;
- le ampie superfici "fresche" di scavo, presso le quali si deve necessariamente operare.
- lo stato del piano di calpestio della galleria, le cui condizioni possono rendere difficoltosa la fuga in caso di necessità;

La vasta diffusione dello scavo meccanizzato prodottasi negli ultimi anni, grazie ai progressi tecnologici conseguiti in fatto di TBM, ha migliorato notevolmente la produttività e la sicurezza del lavoro in galleria, tuttavia, lo scavo convenzionale rimane in molte situazioni l'unica scelta possibile. Da qui l'importanza di garantire la regolarità degli avanzamenti ed eccellenti condizioni di sicurezza del lavoro anche in queste situazioni.

2. Il rischio nello scavo con metodo convenzionale

Secondo la definizione dell'International Tunnelling Association [2], lo scavo con metodo convenzionale consiste nella realizzazione di aperture sotterranee attraverso un processo ciclico di costruzione che prevede lo svolgimento di tre fasi principali:

- scavo d'avanzamento, mediante esplosivo o escavatori meccanici (frese puntuali, demolitori idraulici, ecc.);
- smarino;
- installazione dei rivestimenti di prima fase (centine, bulloni, calcestruzzo proiettato etc.) e definitivi.

Si ha, nella pratica, una sorta di "catena di montaggio": dopo ogni avanzamento del fronte si procede al distacco meccanico degli eventuali cunei di roccia rimasti instabili in calotta (disgaggio), quindi il materiale abbattuto (marino) si carica sugli appositi automezzi e si trasporta all'esterno, si mettono poi in opera, in successione, il rivestimento di prima fase, l'eventuale arco rovescio, i teli per l'impermeabilizzazione e il rivestimento definitivo, mentre contemporaneamente si procede all'esecuzione delle opere di stabilizzazione preventiva eventualmente necessarie prima del nuovo avanzamento del fronte.

Nella prassi realizzativa, a livello internazionale la metodologia di scavo convenzionale è caratterizzata da un'elevata variabilità applicativa, essendo fortemente influenzata dall'esperienza locale del progettista

e dell'esecutore, dalle peculiarità geologiche e geotecniche/geomeccaniche del sottosuolo nei diversi Paesi, nonché dalle attrezzature localmente disponibili.

Dal punto di vista della produttività, il principale rischio associato allo scavo di gallerie è senz'altro quello di affrontare tale complessa operazione senza un progetto adeguato, quindi senza gli strumenti indispensabili per affrontare senza improvvisare eventuali situazioni geologico/geotecniche sottovalutate o imprevedibili, assicurando una sufficiente regolarità d'avanzamento del fronte di scavo.

Dal punto di vista della sicurezza dei lavoratori, i principali rischi associati allo scavo di gallerie con metodo convenzionale possono essere individuati in:

- caduta massi dalla calotta o dal fronte di scavo;
- lavoro in spazi ridotti;
- numero di lavoratori al fronte;
- diverse attrezzature pesanti operanti in spazi angusti;
- elevati afflussi di acqua e fango;
- venute di gas;
- cadute dall'alto;
- perdita di visibilità;
- lavorazioni manuali, come la manipolazione di utensili pneumatici, aste di perforazione, supporti, frese.

Un altro fattore di criticità rilevante è dato dalla contemporaneità delle azioni [3]: ogni fase di lavoro è caratterizzata da rischi specifici e la sovrapposizione di azioni diverse provoca un aumento esponenziale del rischio complessivo.

L'elevata pluralità di soggetti coinvolti nelle diverse fasi esecutive costituisce un ulteriore potenziale rischio per la gestione della costruzione della galleria, che dev'essere sempre affrontata con una visione unitaria. A questo scopo è fondamentale l'adozione di approcci progettuali e costruttivi integrati, capaci di superare o almeno minimizzare la portata di tutti i potenziali rischi.

2.1. Provvedimenti per la riduzione del rischio nello scavo con metodo convenzionale

Nell'ultima parte del secolo scorso si è ritenuto che la soluzione per ridurre il rischio nello scavo convenzionale di gallerie potesse essere l'adozione del cosiddetto "metodo osservazionale", che prevede la possibilità di mettere a punto il progetto durante la costruzione dell'opera.

Sia la norma europea EN 1997-1: Eurocodice 7 [4] che le Norme Tecniche per le Costruzioni [5], sanciscono che la progettazione può far ricorso a questo metodo nei casi in cui, a fronte dell'importanza e impegno dell'opera, per la particolare complessità della situazione geo idrologica e geotecnica/geomeccanica, dopo estese e approfondite indagini conoscitive, permangano documentate ragioni d'incertezza, risolvibili solo in fase di costruzione dell'opera.

Purtroppo, la possibilità concessa in talune situazioni, da detta normativa di "mettere a punto il progetto di una galleria in corso d'opera", in passato è stata da molti mal interpretata, facendo ritenere corretto iniziare a costruire un'opera sotterranea senza il supporto di un progetto sufficientemente accurato e attendibile. Lo studio di previsione della Risposta Deformativa attesa, irrinunciabile in qualsiasi serio progetto di opera sotterranea, era frequentemente basato sulle classificazioni geomeccaniche (Bieniawski, Barton, ecc.) considerando modelli esclusivamente di tipo bidimensionale, e la Risposta Deformativa era di conseguenza identificata nella sola convergenza della cavità: di fatto s'ignorava completamente l'essenza tridimensionale del problema statico dell'avanzamento di un fronte di scavo in galleria!

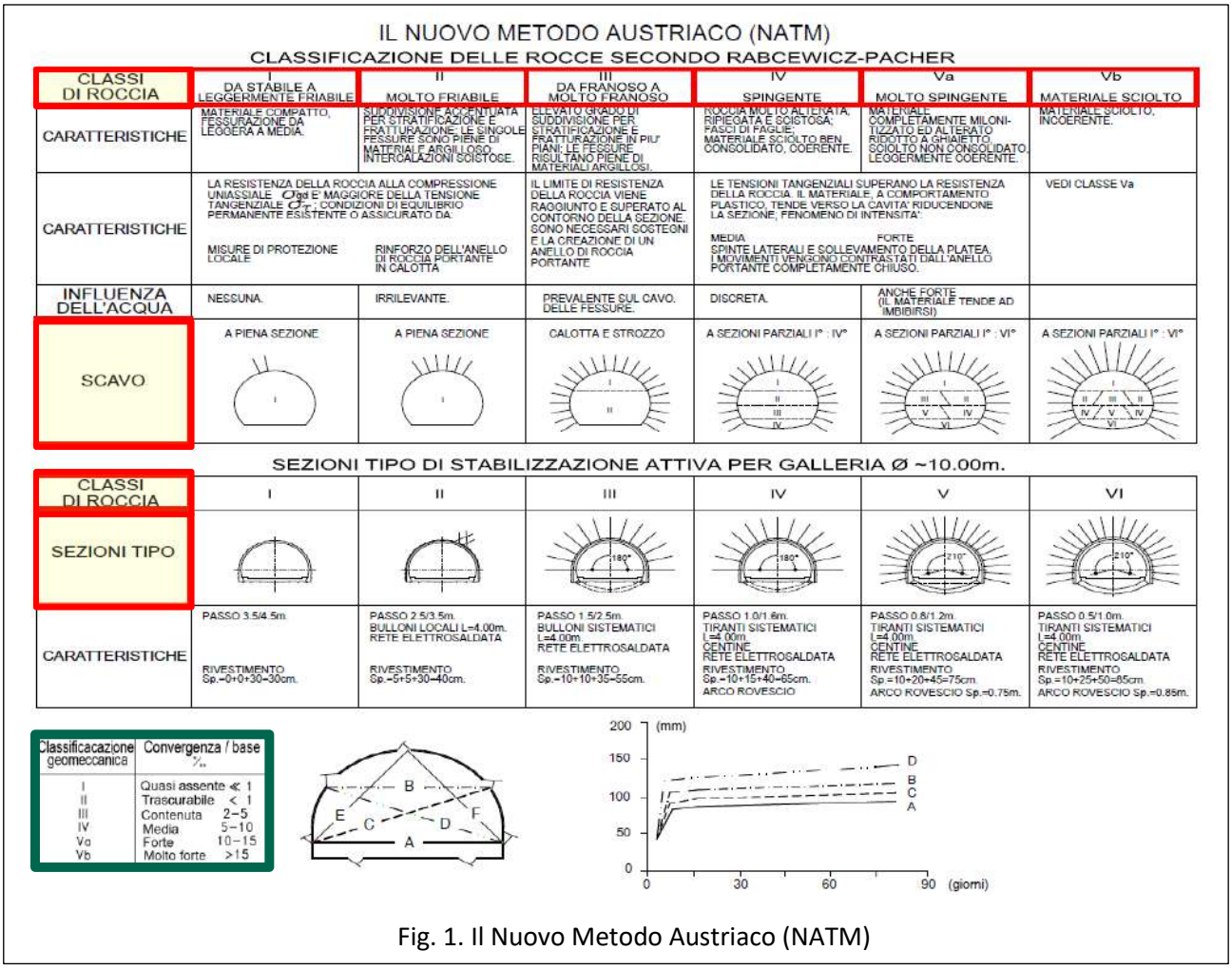

Fig. 1. Il Nuovo Metodo Austriaco (NATM)

Se questo modo di affrontare la realizzazione di un'opera sotterranea può non dare grossi problemi in situazioni di scavo in terreni di discreta qualità geomeccanica in relazione alla copertura in gioco, si fa subito problematico in situazioni più complesse, nelle quali, non disponendo di un completo progetto di riferimento, si è costretti a provare contromisure in corso d'opera.

Ecco quindi che (fig. 1):

- l'instabilità del fronte di scavo è affrontata sul campo parzializzando il fronte d'avanzamento in due o più parti;

- quella del cavo è affrontata mediante strumenti di stabilizzazione quali: bulloni, centine d'acciaio, spritz-beton e archi rovesci più o meno provvisori;

- la stabilità dell'opera è controllata attraverso l'esecuzione di misure di convergenza del cavo, a volte addirittura paragonando i valori misurati con quelli previsti sulla base dell'esperienza riportata in letteratura di gallerie scavate in condizioni ritenute più o meno analoghe (classificazioni geomeccaniche).

Questo modo di procedere, adottato ancor oggi in molti Paesi, presenta molteplici difetti:

- non consente di garantire adeguatamente la sicurezza dell'avanzamento e la stabilità degli scavi nelle situazioni tenso-deformative che, per la scarsa qualità del terreno da scavare e/o per l'esistenza di severi vincoli (esempio: entità dei cedimenti ammissibili in superficie nel caso di scavi in zona urbana) risultano non affrontabili con la sola parzializzazione del fronte di scavo;

- non consente, a causa degli angusti spazi disponibili a seguito della parzializzazione del fronte, di avvantaggiarsi in alcun modo della potenza delle grandi macchine per il tunnelling oggi disponibili, sia

per incrementare le produzioni sia per aumentare la sicurezza degli scavi, riducendo il numero delle maestranze necessarie per operare l'avanzamento del fronte;

- non consente, soprattutto nei terreni eterogenei e in condizioni non standard, di raggiungere una accettabile costanza delle produzioni, essendo assente un progetto di riferimento, in cui siano previsti i provvedimenti da adottare per tutte le possibili situazioni;

- non consente, in definitiva, di prevedere attendibilmente i tempi e i costi di costruzione delle opere, poiché in condizioni difficili queste vengono progettate e decise prevalentemente in corso d'opera.

In realtà, la succitata normativa, pur concedendo in talune situazioni di "mettere a punto il progetto di una galleria in corso d'opera" non prevedeva e non prevede affatto che la stessa possa essere di fatto completamente progettata durante la sua costruzione. E infatti per l'applicazione del metodo osservazionale la stessa normativa richiede:

- di stabilire preventivamente i limiti di accettabilità dei valori delle grandezze rappresentative del comportamento del sistema manufatto-terreno (deformazioni, cedimenti, ecc.);
- di dimostrare l'accettabilità della soluzione prescelta in rapporto a tali limiti;
- di prevedere soluzioni alternative, congruenti con il progetto, definendo i relativi oneri economici;
- di istituire un adeguato sistema di monitoraggio in corso d'opera, con i relativi piani di controllo, tale da consentire tempestivamente l'adozione di una delle soluzioni alternative previste, qualora i limiti indicati siano raggiunti.

Un approccio integrato di progettazione e costruzione di gallerie capace di rispondere appieno alla normativa in questione, facendo marcare un progresso sostanziale anche in tema di gestione del rischio e sicurezza del lavoro in galleria, è stato certamente l'approccio a piena sezione, concepito e messo a punto in Italia negli anni '90 del secolo scorso e noto come Analisi delle Deformazioni Controllate nelle Rocce e nei Suoli (ADECO-RS). Ciò emerge chiaramente dall'analisi dei risultati conseguiti con questo approccio, sia in Italia che all'estero, durante la realizzazione in scavo convenzionale di gallerie per parecchie centinaia di chilometri, nei più svariati tipi di terreno e di condizioni tenso-deformative, comprese le più difficili.

Dopo aver dimostrato in Italia la sua validità con la realizzazione, nel rispetto dei tempi e dei costi previsti in sede di progettazione esecutiva e senza gravi infortuni ai fronti di scavo, di alcune importanti gallerie ferroviarie [6] [7], esso si è affermato sulla ribalta internazionale tra il 1997 e il 1998 cogliendo un clamoroso successo con la realizzazione in Francia, nei tempi ed entro il budget contrattuale, della galleria "Tartaiguille", generalmente ritenuta "impossibile" da portare a termine nei tempi richiesti dal committente (SNCF) con i metodi allora in voga [8].

Per le proprie caratteristiche di affidabilità, sicurezza e convenienza economica, l'approccio a piena sezione è stato presto adottato nei capitolati e nelle normative delle maggiori amministrazioni italiane. Giova a tal proposito evidenziare che di pari passo in Italia si è registrato un clamoroso decremento dell'incidentalità presso i fronti di scavo in galleria [9][1].

Negli altri Paesi, pur evidenziandosi i limiti degli approcci tradizionali utilizzati, vuoi per una difficoltà a procedere con radicali cambiamenti, vuoi per una effettiva difficoltà ad adeguare le normative nazionali, si è spesso cercato di ammodernarli mutuando, non sempre con esito soddisfacente, dall'approccio italiano.

[1] Su oltre 100 Km di gallerie scavate in tradizionale a piena sezione tra il 1999 e il 2008 per la realizzazione degli attraversamenti appenninici ferroviario (TAV) e stradale (VAV) tra Bologna e Firenze, gli infortuni gravi verificatisi durante le lavorazioni presso i fronti di scavo sono stati rimarchevolmente contenuti [9].

Di conseguenza, questo ha trovato piena applicazione al di fuori dell'Italia soprattutto per risolvere situazioni ormai compromesse di gallerie che, con i metodi tradizionali, erano risultate impossibili da portare a termine con successo, come, per esempio, i tunnel n. 8 e 8a di Sochi (Russia), dove messo al confronto diretto con l'avanzamento a sezione parzializzata, utilizzato contemporaneamente per la realizzazione di altre gallerie in condizioni analoghe dal punto di vista geologico-geotecnico, ha dimostrato la propria straordinaria efficacia da ogni punto di vista (fig. 2), compreso quello economico-finanziario [10].

2.2. I principi informatori dell'approccio italiano a piena sezione

Contrariamente agli approcci del passato, coi quali si progetta costruendo, l'approccio a piena sezione, introdotto in Italia nei primi anni '90, insegna a separare nettamente il momento della progettazione da quello della costruzione. Al momento della progettazione, la Risposta Deformativa attesa è studiata in termini di Analisi e Controllo servendosi di modelli esclusivamente tridimensionali, capaci di cogliere, senza perdere dati e relazioni decisamente non trascurabili, la complessità dei fenomeni tenso-deformativi che avvengono a monte del fronte d'avanzamento di una galleria e, solo come conseguenza, anche a valle dello

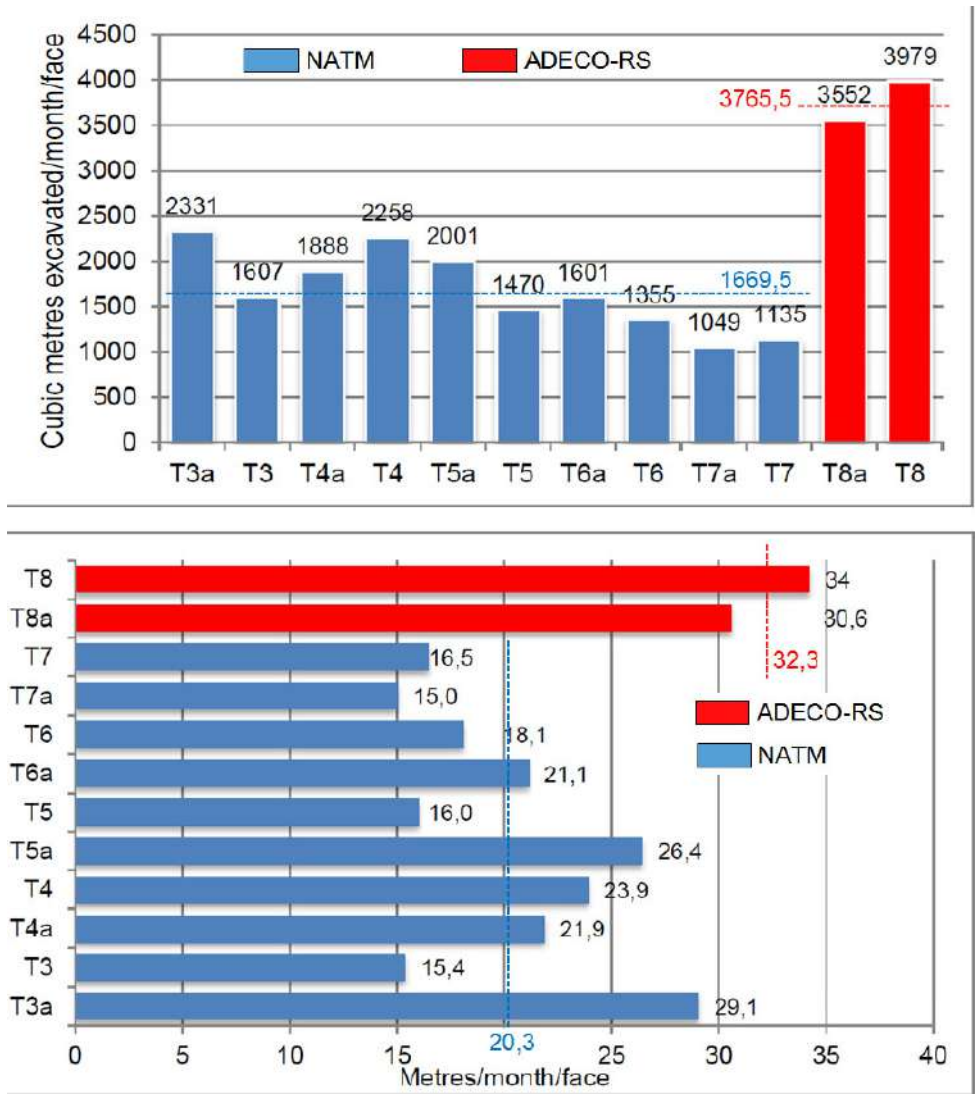

Fig. 2. Gallerie di Sochi (Russia): confronto prestazionale tra approcci a sezione parzializzata (NATM) e a piena sezione (ADECO-RS) in termini di volume di scavo/mese/fronte (in alto) e di metri di tunnel finito/mese/fronte (in basso)

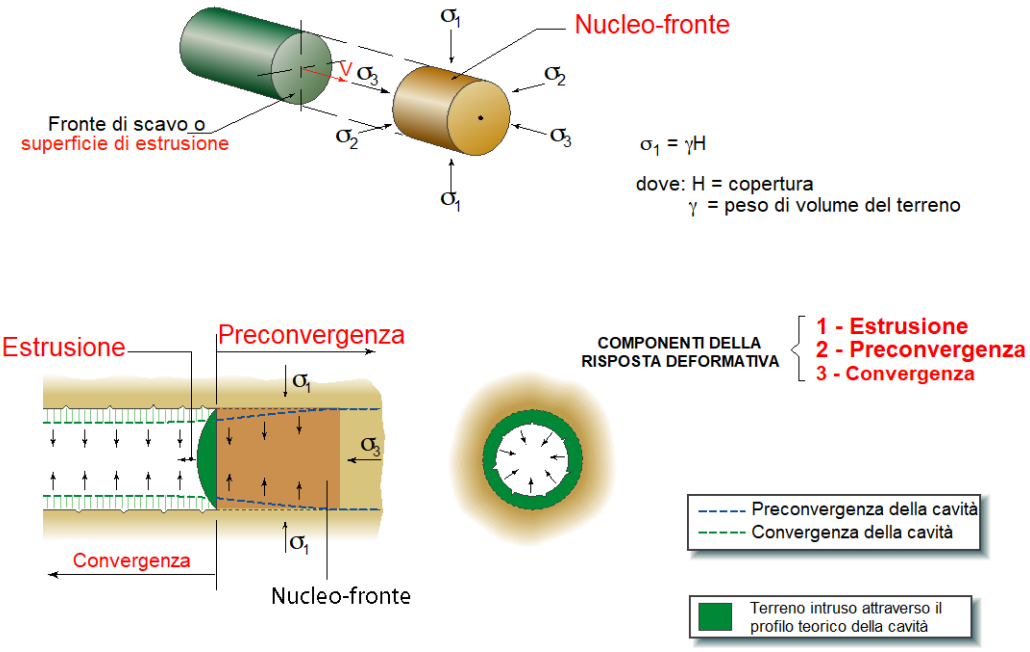

Fig. 3. Il nucleo-fronte e le 3 componenti della Risposta Deformativa

stesso. Infatti, come ormai noto da molti anni, la Risposta Deformativa del terreno allo scavo non è solo convergenza, come assunto dagli approcci di progettazione e costruzione di opere in sotterraneo del passato. La convergenza è solo l'ultimo stadio di un fenomeno deformativo assai complesso, che si origina a monte del fronte di scavo sotto forma di estrusione e preconvergenza del terreno che costituisce il nucleo-fronte per poi evolvere a valle del fronte stesso sotto forma di convergenza della cavità (fig. 3) [11] [12].

Di conseguenza, contrariamente agli approcci del passato, che per controllare la Risposta Deformativa operano solo all'interno della cavità, a valle del fronte d'avanzamento, con bulloni, centine, spritz-beton e archi rovesci più o meno provvisori, nell'illusione di poter fronteggiare qualsiasi eventuale situazione d'instabilità attraverso la parzializzazione del fronte di scavo, l'approccio italiano a piena sezione previene la potenziale instabilità del nucleo-fronte e di conseguenza quella della cavità, ritrovando nello scavo

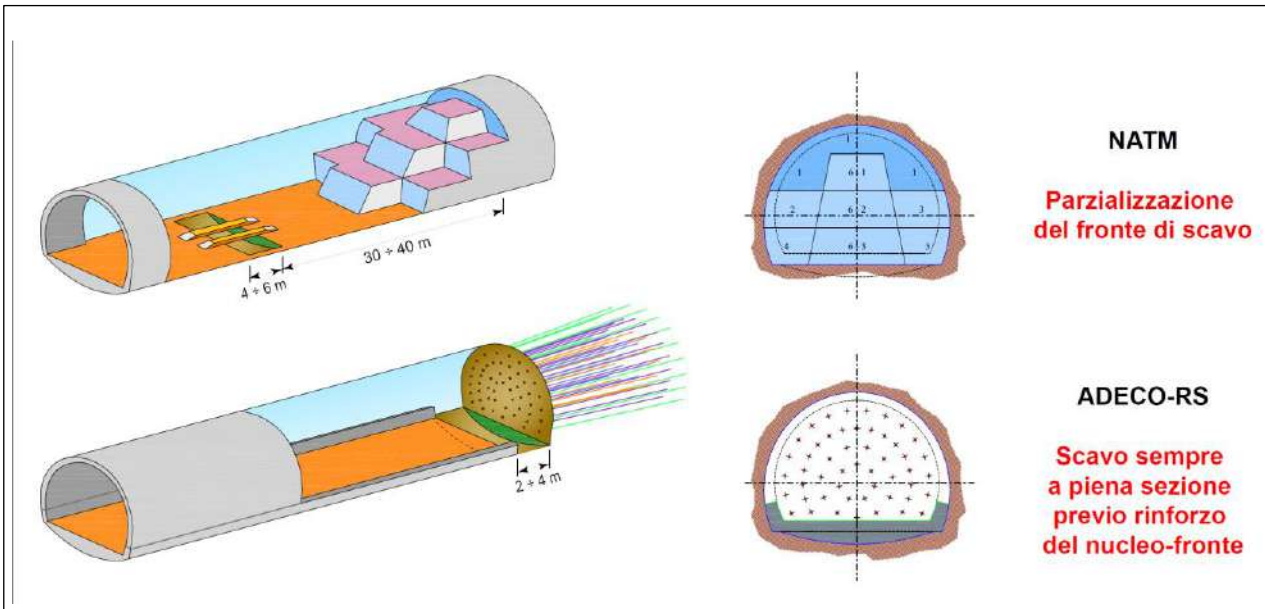

Fig. 4. Avanzamento a sezione parzializzata VS avanzamento a piena sezione

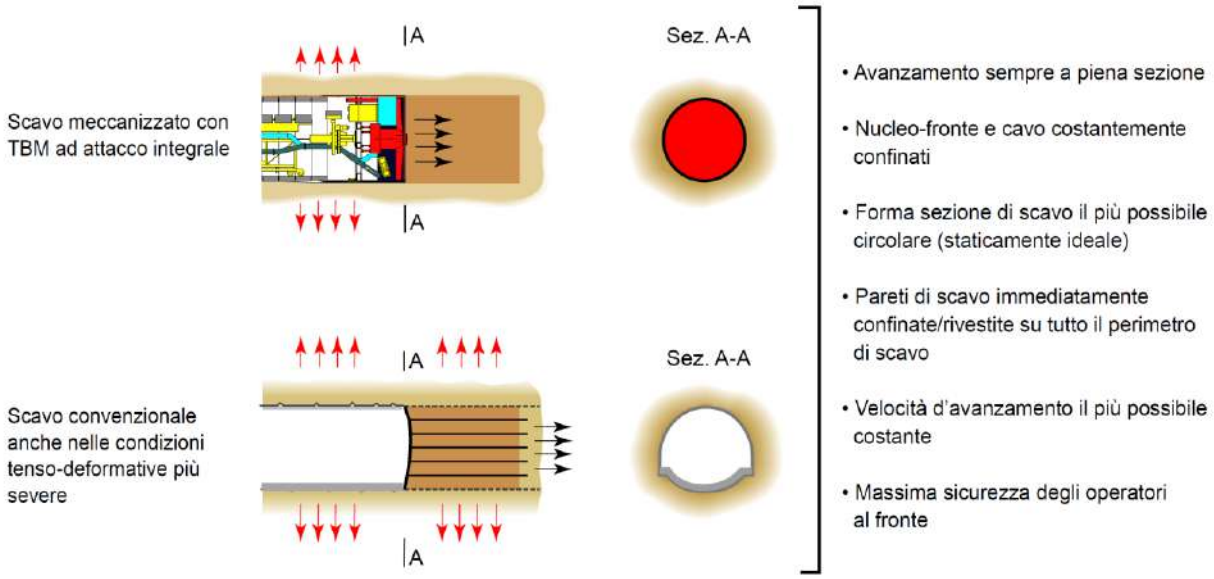

Fig. 5. L'approccio italiano a piena sezione ritrova nello scavo convenzionale le medesime caratteristiche che hanno determinato il successo delle TBM nello scavo meccanizzato

convenzionale le medesime caratteristiche che hanno determinato il successo delle TBM nello scavo meccanizzato: attacco integrale, nucleo-fronte costantemente confinato, sezione di scavo perfettamente circolare (staticamente ideale), pareti di scavo immediatamente rivestite su tutto il perimetro di scavo. Infatti, l'approccio italiano insegna ad avanzare sempre a piena sezione, utilizzando quale principale "strumento di controllo" della potenziale instabilità del fronte di scavo il nucleo-fronte stesso (opportunamente rinforzato e/o protetto perimetralmente se necessario) e quale "strumento di controllo" della convergenza del cavo la chiusura immediata del prerivestimento con l'arco rovescio gettato a ridosso del fronte (così da ottenere una forma del cavo il più possibile circolare) (figure 4 e 5) [13].

L'avanzamento sistematico a piena sezione, anche nelle situazioni tenso-deformative più difficili è senza dubbio la caratteristica che ha permesso di ottenere una vera industrializzazione degli scavi ed elevati standard di sicurezza.

Un'illustrazione esaustiva sui principi informatori e i criteri applicativi dei moderni approcci progettuali e costruttivi di opere in sotterraneo, di cui l'ADECO-RS è capostipite, non è negli intendimenti di questo articolo. A tale scopo, il lettore interessato potrà consultare i seguenti riferimenti bibliografici: [11] [12] [13] [14].

Ma perché avanzare a piena sezione, anche nelle situazioni tenso-deformative più difficili, presenta vantaggi anche in termini di sicurezza? Apriamo, per spiegarlo, una breve parentesi sul tema della sicurezza e mitigazione del rischio.

3. Sicurezza e mitigazione del rischio

3.1. La mitigazione del rischio

Il rischio è insito in tutte le applicazioni ingegneristiche e la costruzione di gallerie è soggetta a pericoli provenienti da fonti diverse. Nelle prime fasi di progettazione e di negoziazione degli appalti

e dei contratti, alcuni rischi possono essere trasferiti, sia contrattualmente che tramite assicurazione, dal committente all'appaltatore, altri possono essere mantenuti in capo al committente, altri ancora possono invece essere eliminati o attenuati. Nella fase di costruzione, le possibilità di trasferimento del rischio sono minime e la strategia più vantaggiosa, sia per il proprietario dell'opera che per l'appaltatore, è quella di ridurre il più possibile i rischi attraverso la pianificazione e l'attuazione di iniziative volte alla loro eliminazione o mitigazione. Ma cosa s'intende per rischio?

Parlando di sicurezza e salute sul lavoro, il rischio è la probabilità che una persona possa essere danneggiata o subisca effetti negativi sulla sua salute se esposta a un pericolo. Questo combina le probabilità di vari eventi possibili e la valutazione del danno corrispondente in un singolo valore. Tuttavia, le occorrenze effettive sono spesso più complesse e in uno scenario reale, con diversi incidenti possibili, il rischio totale è la somma dei rischi per ogni singolo incidente, a condizione che i risultati siano comparabili:

$$R = \sum_{tutti\ i\ rischi} (probabilità)\ x\ (occorrenza)$$

Pertanto, il livello di rischio (R) è classificabile sulla base di:
(i) potenziale danno o effetto negativo sulla salute che il pericolo può causare
(ii) numero di volte in cui gli operatori ne sono esposti
(iii) numero di operatori esposti

Quando il rischio riguarda la vita umana, e in particolare la salute e la sicurezza delle maestranze sui luoghi di lavoro, è ovvio che l'entità dell'evento o la potenziale perdita in caso d'incidente potrebbero avere conseguenze disastrose. Un approccio moderno, come dettato dalle principali normative, richiede una mentalità proattiva, cioè la valutazione e la gestione di tutti i rischi, compresi quelli residui che permangono nonostante le misure preventive e protettive attuate.

3.2. La gerarchia delle azioni di controllo del rischio

La gerarchia delle azioni di controllo del rischio è uno strumento decisionale adottato nelle normative più recenti e utilizzato nell'industria per eliminare o ridurre al minimo l'esposizione dei lavoratori ai rischi.

Esistono diversi tipi di azioni che è possibile implementare a questo scopo.

- azioni tecniche, come ad esempio la progettazione e l'impiego di macchine intrinsecamente sicure;
- azioni procedurali, che richiedono la definizione di una procedura e la sua applicazione da parte delle persone. Per queste azioni è richiesto che le persone comprendano le procedure e le applichino in maniera corretta;
- azioni comportamentali, che includono formazione e addestramento.

Ognuna di queste azioni ha un diverso grado di efficacia per raggiungere lo scopo.

La norma ISO 45001:2018 "*Sistemi di gestione per la salute e sicurezza sul lavoro – Requisiti e guida per l'uso*" individua chiaramente 5 categorie principali di azioni di sicurezza, diversificate in relazione al loro grado di efficacia, e assegna loro una ben precisa gerarchia indicando che, nella scelta delle azioni da adottare per garantire il massimo della salvaguardia ai lavoratori, si devono

preferire quelle che nella gerarchia occupano le posizioni più alte. In altre parole, ogni azione appartenente a una categoria si dovrebbe adottare solo se quelle appartenenti, nella gerarchia, a categorie superiori, non sono implementabili o appaiono insufficienti.

Le categorie di azioni indicate dalla norma sono (vedasi figura 6):

1. **Eliminazione**

L'eliminazione del rischio consiste nella sua rimozione fisica ed è l'azione di controllo del rischio in assoluto più efficace. Ad esempio, se i lavoratori devono svolgere lavori in quota, il rischio può essere eliminato spostando l'oggetto su cui devono lavorare a livello del suolo.

2. **Sostituzione**

La sostituzione è l'azione di controllo del pericolo più efficace dopo l'eliminazione. Essa consiste nella sostituzione di qualcosa che produce un rischio con qualcos'altro che non lo produce.

Un esempio è la sostituzione di un lavoro manuale con un analogo lavoro svolto da una macchina.

3. **Ingegnerizzazione**

Dopo l'eliminazione e la sostituzione, la categoria di azioni più efficaci per controllare il rischio sono i controlli di ingegneria, che comprendono tutto ciò che può essere progettato e realizzato per rendere più sicuro l'ambiente di lavoro. Si tratta di misure tecniche di protezione collettiva che pur non eliminando il rischio, lo riducono su tutto l'ambiente di lavoro. Esse agiscono sul fattore magnitudo, ovvero sulle conseguenze dell'eventuale accadimento dell'evento calamitoso.

4. **Controllo**

Appartengono a questa categoria le azioni di controllo amministrative che comportano modifiche al modo o alle condizioni in cui le persone lavorano. Esempi di azioni di controllo amministrative includono le modifiche delle procedure, la formazione dei lavoratori, l'installazione di cartelli ed etichette di avvertimento, ecc. I controlli amministrativi non rimuovono il rischio, ma riducono

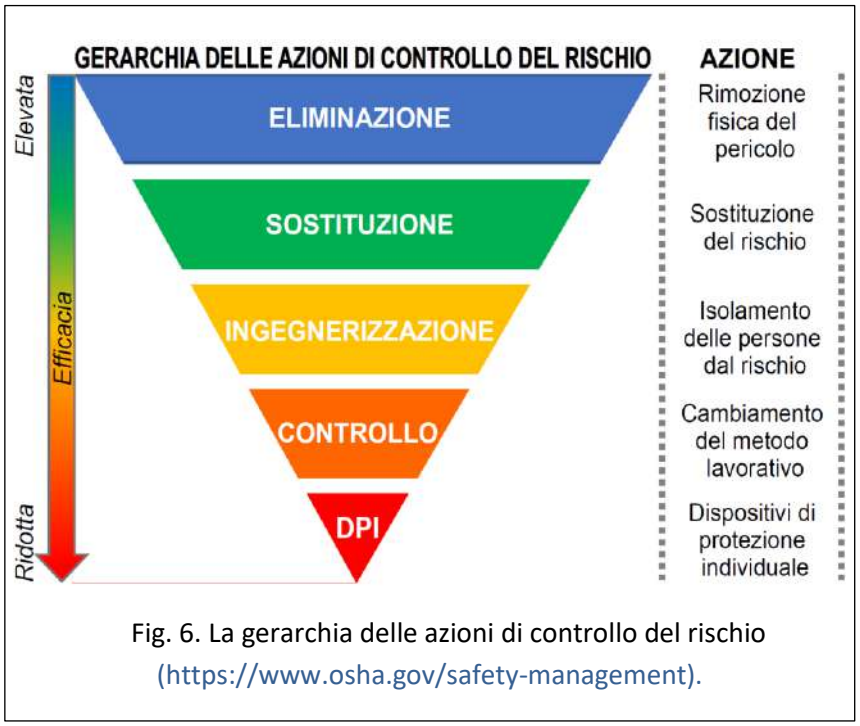

Fig. 6. La gerarchia delle azioni di controllo del rischio (https://www.osha.gov/safety-management).

l'esposizione delle persone al rischio. Un esempio è la programmazione della manutenzione delle strade di notte, quando il numero di veicoli che vi circolano è molto ridotto.

5. DPI

L'utilizzazione dei DPI (Dispositivi di Protezione Individuale), comprendenti guanti, respiratori, elmetti, occhiali di sicurezza, indumenti ad alta visibilità, calzature di sicurezza, ecc., è l'azione gerarchicamente meno efficace per controllare il rischio. È l'ultima linea di difesa, ma ciò non significa che non sia importante. Le misure di protezione individuale devono essere considerate integrative o supplementari delle precedenti, mai sostitutive.

Da ultimo, è bene ricordare che complementari a tutte le misure di sicurezza sopraelencate sono le misure di corretto esercizio (o gestione della sicurezza), cioè l'insieme delle misure gestionali finalizzate a evitare che le misure sopra individuate possano essere vanificate; il miglior progetto di sicurezza di un'attività può infatti essere vanificato da uno scorretto esercizio della stessa.

Il corretto esercizio, ai fini della sicurezza, si realizza sempre e comunque mediante la realizzazione di tre condizioni:

1) informazione del personale sui rischi lavorativi e sull'esistenza di misure di sicurezza per contrastarli, formazione e addestramento sull'applicazione delle misure di sicurezza;
2) aggiornamento delle misure di sicurezza
3) gestione delle emergenze condotta in modo pianificato.

3.3. La normativa di riferimento e le sue evoluzioni

Dal punto di vista normativo, è interessante notare come la questione della sicurezza degli scavi in galleria abbia cominciato ad essere considerata un argomento importante a partire dagli anni '40 del secolo scorso. È infatti del 1941 la pubblicazione negli Stati Uniti della prima linea guida in merito, il Bollettino n. 439 del Bureau of Mine "*Some essential safety factors in tunneling*" [14].

Anche l'International Tunnelling and Underground Space Association ha svolto un ruolo importante nel promuovere un approccio sistematico alla sicurezza degli scavi in galleria e consolidare una coscienza sul tema. Dalla fine degli anni '90 del secolo scorso sono stati adottati, in Paesi membri capofila, regolamenti coerenti e sostanziali in materia di salute e sicurezza sul lavoro, come ad esempio: le "*Guidelines for tunnelling risk management"* curate dal Gruppo di lavoro n. 2 dell'International Tunnelling Association nel 2004 [15], o "*Code of Practice for Health and Safety in Tunnelling in the Construction Industry*" pubblicato dalla British Tunnelling Society nel 2011 [16].

In Italia, si ricordano la Legge Merloni del 1994 e successive modifiche [17], che introdusse per le opere pubbliche l'obbligatorietà di redigere un Piano di Sicurezza, il D. Lgs. 626 del 1994 [18], emanato per l'applicazione delle direttive europee riguardanti il miglioramento della sicurezza e della salute nei luoghi di lavoro e il D. Lgs 494 del 1996 [19], in cui erano normati chiaramente i contenuti che doveva avere il "Piano di Sicurezza e Coordinamento", nonché il D. Lgs 81 del 9 aprile 2008 [20], attuativo dell'art. 1 della Legge 3 agosto 2007, n. 123.

Per sopperire ai vuoti legislativi in materia di sicurezza dei cantieri per le Grandi Opere, fornendo un valido strumento a tutti i soggetti interessati, nel 1998 in Italia hanno inoltre fatto il loro debutto le NIR (*Note Interregionali d'Ingegneria della Sicurezza nello scavo di gallerie*): una serie di regole sviluppate dai Servizi Salute e Sicurezza sul Lavoro delle Regioni Emilia-Romagna e Toscana che

sono state elaborate facendo tesoro dell'esperienza maturata durante la costruzione della linea ferroviaria ad alta velocità Milano-Roma-Napoli nel tratto tra Bologna e Firenze (lunghezza totale di scavi in sotterraneo 104,3 km, per lo più in convenzionale) e della Variante di Valico, cioè del tratto di riqualificazione dell'autostrada A1 Milano-Napoli tra Sasso Marconi (Bologna) e Barberino di Mugello (Firenze) (lunghezza totale di scavi in sotterraneo 62,2 km, di cui più di 10 scavati mediante TBM EPB da 15,62 m di diametro), entrambe realizzate applicando integralmente l'approccio progettuale e costruttivo a piena sezione.

Esse, integrando alcune carenze della normativa nazionale cogente, coprono tutte le problematiche legate alla realizzazione di un'opera sotterranea, dalla fase di progettazione a quella di costruzione, focalizzando l'attenzione sul raggiungimento della massima sicurezza durante l'esecuzione dei lavori. È interessante osservare che, per lo scavo in convenzionale, le NIR considerano solo l'avanzamento a piena sezione, essendo questa scelta progettuale e costruttiva privilegiata dai capitolati delle maggiori amministrazioni italiane (ANAS, Autostrade per l'Italia, RFI, ITALFERR), che in seguito alle numerose esperienze maturate sul campo soprattutto negli anni '80, hanno ritenuto questa soluzione vincente sotto molteplici aspetti rispetto all'avanzamento con fronte parzializzato.

Dal 1998 ad oggi sono state redatte 45 Note, che sono state poi esportate da clienti e appaltatori in altre regioni italiane, fino ad essere ora adottate su buona parte del territorio nazionale.

Ogni Nota, identificata da un numero e correlata a un argomento specifico, è un trattato tecnico monotematico, contenente soluzioni progettuali, costruttive, organizzative, tecnologiche e operative. Fondamentale è stata la partecipazione, alla loro redazione, di diverse figure professionali: progettisti, società di servizi, produttori di apparecchiature, macchine, sistemi di comunicazione e controllo, che hanno contribuito, ognuno per la propria parte, allo sviluppo delle soluzioni che vi si trovano formalizzate.

Per come sono state concepite e strutturate, le NIR sono documenti "*in progress*", ovverosia documenti che vengono di volta in volta aggiornati sulla base sia delle osservazioni a carattere ingegneristico rilevate in situ, sia dei risultati ottenuti, attraverso la loro applicazione, in termini d'incremento della sicurezza e positiva fattibilità tecnico – economica[2].

Si tratta di linee guida per la sicurezza nei cantieri di scavo sotterranei basate sempre sul più avanzato livello delle conoscenze scientifiche, tecniche e tecnologiche acquisite nel settore dell'ingegneria degli scavi. Vi si trovano suggerite procedure, impianti, macchine, layout e soluzioni d'ingegneria per la salvaguardia della sicurezza dei lavoratori, dalla progettazione alla realizzazione dell'opera, organiche e immediatamente applicabili, spesso profondamente migliorative rispetto all'approccio della Normativa Nazionale.

Allo stato attuale delle cose, risultano ancora come riferimento applicabile la NIR37 ≪*Sicurezza in fase di scavo*≫ [22] e la NIR41 ≪*Lavori a ridosso del fronte*≫ [23] con i suoi addendum applicativi [24], [25]. La prima, vietando il subappalto delle azioni elementari di cui si compone la fase di scavo ne garantisce l'unicità di governo, riducendo notevolmente il rischio infortunistico; la seconda, invece, introduce soluzioni tecniche, organizzative e progettuali di ingegneria e sicurezza

[2] La Conferenza delle Regioni e delle province Autonome sta lavorando alla redazione di Linee Guida che raccolgano in maniera più strutturata le indicazioni fornite dalle NIR. Allo stato attuale, delle 15 Linee Guida previste, risulta approvata solo la prima che ha come titolo: Linee Guida per il Coordinamento della Sicurezza nella realizzazione delle Grandi Opere [21], mentre le altre pur fornendo indicazioni molto utili, risultano ancora in stato di bozza e quindi non applicabili come riferimento approvato e adottabile.

degli scavi volte a minimizzare il rischio di infortunio, incrementare la velocità d'esecuzione delle lavorazioni e contenere i costi d'esecuzione.

In particolare, essa identifica come criteri chiave per conseguire tutti questi obiettivi: l'implementazione di sistemi automatici, il coordinamento puntuale delle diverse fasi di lavoro e, soprattutto la prevenzione o la limitazione dell'accesso degli operatori al fronte di scavo della galleria durante la realizzazione degli interventi di stabilizzazione.

Ulteriore merito delle NIR è l'aver stimolato Committenti, Società di Progettazione, Appaltatori e produttori di macchine e tecnologie di scavo affinché promuovessero soluzioni innovative atte a minimizzare i rischi e favorire la produttività riducendo le criticità nella gestione del cantiere.

4. La riduzione del rischio e l'approccio a piena sezione

Riprendiamo adesso la domanda lasciata in sospeso al paragrafo 2: perché avanzare a piena sezione presenta indiscutibili vantaggi anche in termini di sicurezza?

Questo risulterà evidente se, tenuto conto del metodo gerarchico dei controlli per la riduzione del rischio, si confrontano gli approcci progettuali e costruttivi del passato (per lo più sequenziali come il NATM e i metodi derivati) con quelli più moderni a piena sezione, di cui l'ADECO-RS è capostipite. A differenza dei primi, che in fase progettuale poco si preoccupano della stabilità del fronte d'avanzamento, rimandando in corso d'opera, alla sensibilità dei responsabili del cantiere, le

Fig. 7A - Avanzamento a sezione parzializzata VS avanzamento a piena sezione

vere decisioni riguardo alle modalità d'avanzamento (parzializzazione del fronte di scavo più o meno spinta) e lasciano libertà al terreno di deformarsi rinviando al termine dei lavori di scavo la chiusura del cavo col getto del rivestimento definitivo di calcestruzzo, l'approccio ADECO-RS si preoccupa sin dalla fase progettuale, sia della stabilità del nucleo-fronte, prescrivendo accuratamente gli eventuali rinforzi necessari, sia della stabilità del cavo a valle del fronte, realizzando immediatamente la chiusura del rivestimento di prima fase con le murette e l'arco rovescio e, a seguire, il getto del rivestimento definitivo di calcestruzzo.

Si tratta di una differenza fondamentale per la sicurezza del cantiere nella zona che è da sempre la più pericolosa per le maestranze: quella degli ultimi 30-40 m prima del fronte di scavo.

Affrontare con efficacia i possibili rischi, agendo ai vertici della gerarchia dei controlli (principalmente attraverso l'eliminazione, la sostituzione e l'ingegnerizzazione) è davvero possibile solo se si agisce sin dalle prime fasi di sviluppo del progetto!

La figura 4 e le fotografie in fig. 7A mettono a confronto le condizioni operative tipiche di un avanzamento a piena sezione con quelle in cui ci si trova a dover operare avanzando a sezione parzializzata. L'analisi di alcune specifiche fasi di lavoro (figura 7B), spiega chiaramente la riduzione del rischio che si ottiene applicando i concetti precedentemente esposti.

Se si avanza a piena sezione, gli spazi di lavoro disponibili al fronte di scavo sono molto ampi e permettono l'impiego in sicurezza, al posto dell'uomo, di macchine e attrezzature grandi e potenti, spesso automatizzate.

Lavorazioni delicate come l'esecuzione degli interventi di consolidamento del nucleo-fronte e del contorno della cavità sono compiute (figura 7B) da macchine dedicate come il "posizionatore", altamente automatizzate. La sua geometria, caratterizzata da due culle che ospitano il sistema di blocchi scorrevoli e bracci telescopici, permette all'operatore di lavorare mantenendosi a distanza dal fronte di scavo, in una zona di galleria già protetta dal rivestimento di prima fase, quindi molto sicura.

Persino l'installazione delle tradizionali centine metalliche è normalmente eseguita "da lontano", utilizzando un mezzo meccanico semovente equipaggiato con tre bracci e telecomandato a distanza; da

Fig. 7B - Avanzamento a sezione parzializzata VS avanzamento a piena sezione

qualche anno quest'operazione è completamente automatizzata grazie all'uso della cosiddetta "centina automatica", che comporta l'assenza completa di lavoratori al fronte di scavo [26].

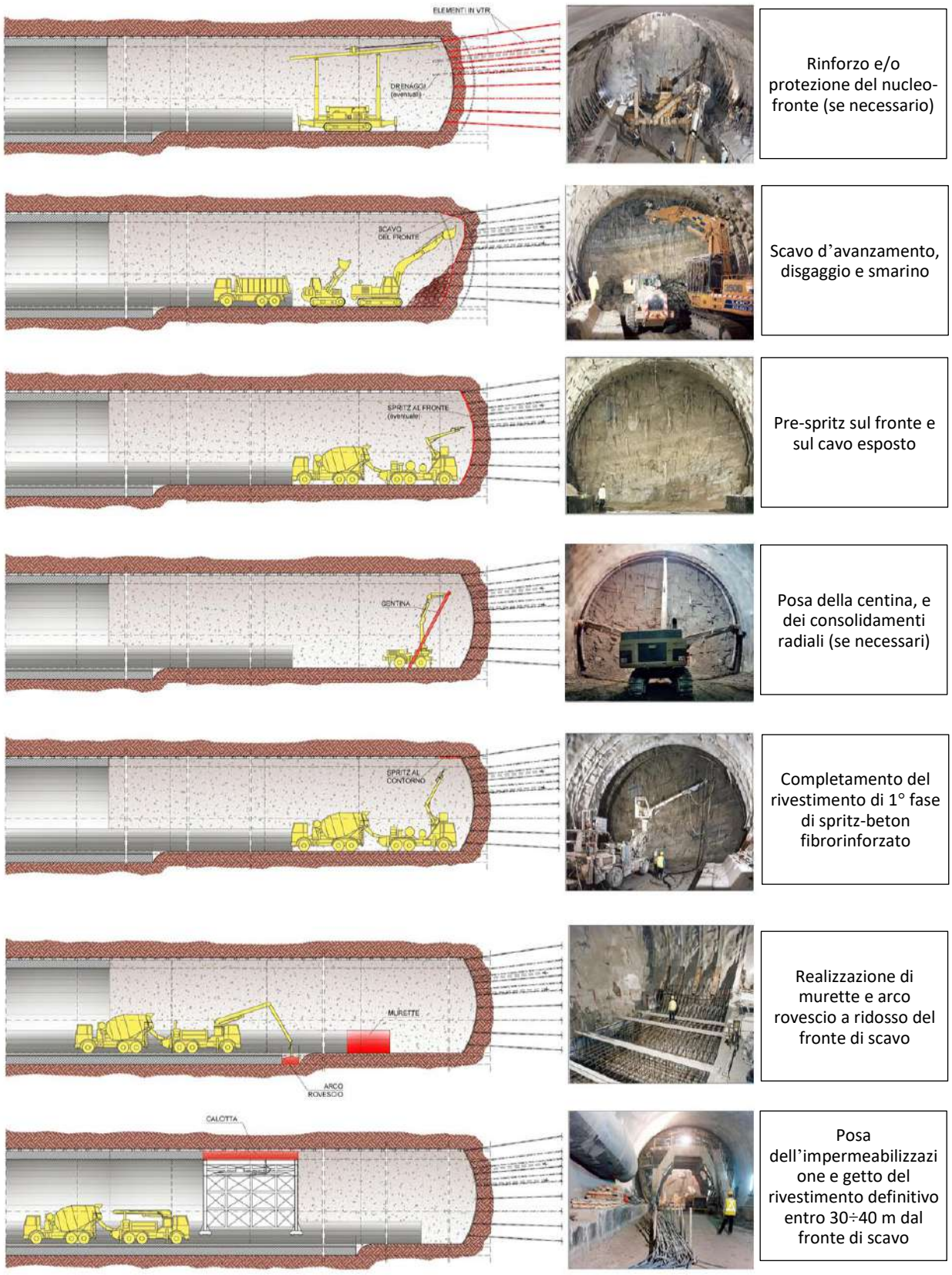

Fig. 8. Tipico ciclo d'avanzamento mediante scavo a piena sezione

Il disgaggio, pure, è sempre eseguito con l'ausilio di un ripper o, se necessario, un martellone idraulico di potenza ridotta per evitare di fratturare la roccia sana e il calcestruzzo viene spruzzato attraverso una lancia di proiezione; in entrambi i casi l'operatore è protetto in cabina. Il prerivestimento in calcestruzzo proiettato sia sul fronte che sulla porzione scavata della cavità svolge una funzione fondamentale ai fini della sicurezza, prevenendo i fenomeni d'instabilità locale soprattutto quando le sezioni di scavo sono notevoli (da 130 m^2 a 230 m^2), come spesso accade nel tunnelling moderno.

Al contrario, come si evince facilmente osservando le figure 7A e 7B, se si avanza a sezione parzializzata gli spazi di lavoro disponibili per gli operatori al fronte di scavo sono molto ridotti e i lavoratori non possono mantenersi a ragionevole distanza di sicurezza da macchine e attrezzature, le quali, oltretutto, hanno giocoforza dimensioni limitate e risultano di conseguenza assai meno produttive.

Grazie alla maggiore efficienza e capacità di lavoro delle macchine utilizzabili avanzando a piena sezione, il numero di maestranze necessarie per operare l'avanzamento del fronte è considerevolmente ridotto e non richiede la presenza dell'operatore a ridosso del fronte di scavo, a vantaggio della sicurezza degli operatori coinvolti nelle specifiche fasi di lavoro.

La figura 8 schematizza lo svolgimento di un tipico ciclo di lavoro per lo scavo convenzionale a piena sezione in condizioni tenso-deformative di nucleo-fronte stabile a breve termine o instabile.

Per ciascuna delle operazioni illustrate nella figura, le succitate NIR forniscono utili indicazioni progettuali, tecniche, operative e procedurali per minimizzare/eliminare il pericolo d'infortunio.

Ogni operazione è ben definita ed eseguita da un ridotto numero di lavoratori esperti, utilizzando, come detto, grandi attrezzature ad elevato valore tecnologico che riducono il rischio di errore umano. L'avanzamento del fronte di scavo avviene secondo un approccio unificato e un'organizzazione razionale del cantiere come nessun altro approccio ha mai consentito: si avanza secondo una chiara sequenza operativa, senza sovrapposizioni cronologiche nell'esecuzione di tipologie d'intervento differenti. Risultano così minimizzati se non annullati i rischi associati all'operazione specifica e quelli relativi alle eventuali interferenze [14].

L'approccio a piena sezione e le NIR si accordano perfettamente col metodo gerarchico per la riduzione dei rischi precedentemente illustrato (fig. 9).

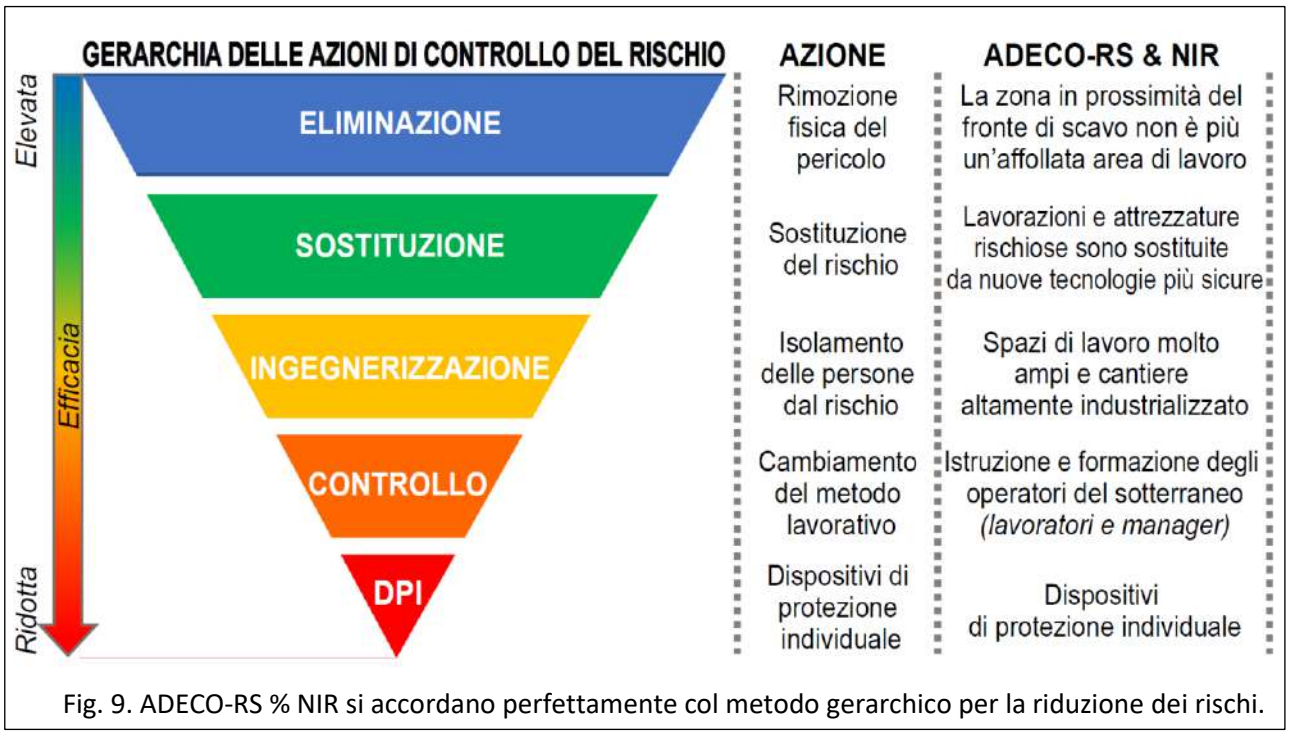

Fig. 9. ADECO-RS % NIR si accordano perfettamente col metodo gerarchico per la riduzione dei rischi.

4.1. Le evidenze

I vantaggi, in termini di costi e sicurezza, dei moderni approcci a piena sezione rispetto a quelli del passato che affrontano l'instabilità del fronte di scavo parzializzandolo in due o più parti, appaiono del tutto evidenti se si analizzano i risultati rispettivamente conseguiti sul campo. Negli ultimi 20 anni si sono costruite in scavo convenzionale a piena sezione, secondo i principi dell'approccio ADECO-RS, oltre 1000 km di gallerie (950 km delle quali progettate dalla sola Rocksoil S.p.A. di Milano) nel pieno rispetto dei costi e dei tempi previsti in sede di progettazione esecutiva, ottenendo sempre eccellenti riscontri in termini di sicurezza dei lavoratori. L'approccio a piena sezione si è dimostrato affidabile in qualsiasi tipo di terreno e situazione tenso-deformativa affrontata, anche per sezioni di scavo superiori a 200 m^2 [27].
In termini prestazionali, ogni volta che i due approcci si sono potuti confrontare direttamente sul campo in condizioni al contorno sufficientemente simili [28] [29] [30], quello a piena sezione ha fatto registrare produzioni nettamente superiori e costi a consuntivo dell'ordine del 30% inferiori.
In termini di sicurezza dei lavoratori, l'approccio a piena sezione ha consentito di costruire oltre 1000 Km di gallerie registrando una ridottissima incidentalità.
È interessante leggere quanto riporta a tal proposito l'Ing. Nicolai Batyrev, dirigente dell'impresa Transstroytunnel di Mosca responsabile della costruzione delle 12 gallerie realizzate a Sochi per i giochi olimpici invernali del 2014 [28]: *"Sebbene le imprese di costruzione e i progettisti russi avessero una vasta esperienza nell'applicazione del NATM e nessuna nell'applicazione dell'ADECO-RS (utilizzato a Sochi per la prima volta in Russia), l'avanzamento nelle gallerie scavate a piena sezione mediante l'ADECO-RS è proceduto senza intoppi e senza alcun incidente. Sfortunatamente, lo stesso non è stato per quelle scavate a fronte partizionato con i criteri del NATM. Anzi, in queste gallerie ci sono stati numerosi incidenti, alcuni dei quali piuttosto gravi, che hanno coinvolto i lavoratori. Questo fatto è chiaramente dovuto all'ampio spazio di lavoro messo a disposizione al fronte dall'ADECO-RS grazie all'avanzamento a piena sezione, che consente la completa meccanizzazione degli scavi: la presenza di lavoratori non protetti nell'area del fronte di scavo è praticamente esclusa. Un altro motivo è che dal momento dello scavo alla completa messa in opera dei rivestimenti di prima fase e finali, passa poco tempo e ciò impedisce allo stato tensionale e deformativo di evolversi fino al punto di sviluppare gravi manifestazioni di instabilità. Infatti, il monitoraggio continuo dello stato tenso-deformativo del nucleo d'avanzamento è stato di grande importanza, anticipando e bloccando qualsiasi situazione rischiosa prima che si verificasse."*

5. Conclusioni

La gestione dei rischi associati ai lavori in sotterraneo segue un processo sistematico, che comporta l'identificazione dei pericoli, la valutazione e il controllo dei rischi. La stima delle incertezze e dei rischi del processo di costruzione sono informazioni essenziali per il processo decisionale nei progetti infrastrutturali.

Il rischio è insito in tutte le applicazioni ingegneristiche e la costruzione di gallerie è soggetta a pericoli provenienti da fonti diverse. Nelle prime fasi di progettazione e di negoziazione degli appalti e dei contratti, alcuni rischi possono essere trasferiti, sia contrattualmente che tramite assicurazione, dal committente all'appaltatore, altri possono essere mantenuti in capo al committente, altri ancora possono invece essere eliminati o attenuati. Nella fase di costruzione, le possibilità di trasferimento

del rischio sono minime e la strategia più vantaggiosa, sia per il proprietario dell'opera che per l'appaltatore, è quella di ridurre il più possibile i rischi attraverso la pianificazione e l'attuazione di iniziative volte alla loro eliminazione o mitigazione.

Il tema della sicurezza è considerato un argomento importante da tempo e in tutto il mondo. In Italia, sin dagli anni '90 del secolo scorso per progettare e costruire opere in sotterraneo s'impiega diffusamente l'approccio ADECO-RS, che nello scavo con metodo convenzionale si caratterizza per l'impiego sistematico dell'avanzamento a piena sezione in qualsiasi condizione tenso-deformativa, previo eventuale rinforzo del nucleo-fronte. Inoltre, il Servizio Salute e Sicurezza sul Lavoro delle Regioni Emilia-Romagna e Toscana ha sviluppato le Norme Interregionali, basate sull'esperienza italiana riferita a più di 150 km di gallerie realizzate con avanzamento a piena sezione secondo i principi dell'ADECO-RS. Ogni NIR è un trattato tecnico monotematico contenente soluzioni progettuali, costruttive, organizzative, tecniche, tecnologiche e operative sviluppate per raggiungere i massimi livelli di sicurezza. È interessante osservare che le NIR sono state elaborate per il metodo di scavo a piena sezione, essendo questa la scelta progettuale e costruttiva indicata nei capitolati delle maggiori amministrazioni italiane per lo scavo convenzionale.

I principali vantaggi dello scavo a piena sezione sono legati all'industrializzazione delle fasi di lavoro: grazie all'utilizzo di macchine ed attrezzature potenti che operano secondo una chiara sequenza di azioni, mai si verifica la sovrapposizione di diversi tipi d'intervento e/o operazioni e in galleria si sposta un numero di operatori particolarmente ridotto. C'è una relazione diretta tra la sicurezza e il numero di lavoratori e di macchine impiegati: meno sono, maggiore è la sicurezza.

Questi vantaggi sono difficilmente conseguibili da approcci che operano l'avanzamento del fronte parzializzandolo in due o più parti, perché non risulta possibile industrializzare sufficientemente le lavorazioni al fronte di scavo, né ridurre i rischi in maniera efficace come insegna il metodo gerarchico. A questo proposito è assai istruttivo leggere quanto scrive l'inglese HSE - Health and Safety Executive nel suo documento "*Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM)* [31], dove si analizzano i numerosi gravi insuccessi di cui è costellata la storia di questo approccio ancor oggi in uso, che affronta l'instabilità del fronte di scavo parzializzando il fronte di scavo in due o più parti, e si evidenzia come la sua sicurezza sia condizionata a tutta una serie d'improbabili condizionalità.

A parere di chi scrive, gli approcci progettuali e costruttivi a piena sezione, moderni, universali e intrinsecamente sicuri, che pongono la sicurezza delle maestranze come elemento imprescindibile sin dalla fase di progettazione fino all'esecuzione, così come avviene nell'approccio italiano, dovrebbero essere considerati un "riferimento" per la progettazione e la realizzazione di opere in sotterraneo in ogni contesto internazionale, in particolare nei Paesi dove la salute e la sicurezza del lavoro, inclusa quella di chi opera nel sottosuolo, sono considerate una priorità.

Bibliografia

[1] Berry, P., Patrucco, M., Commento di Paolo Berry e Mario Patrucco (art. 89-1 04). Capitolo inserito in: La nuova sicurezza sul Lavoro – D. Lgs. 9 aprile 2008, n. 81 e successive modificazioni. Vol. II. Gestione della prevenzione. Collana le riforme del Diritto Italiano; p. 1 34 – 1 46, Zanichelli ed., 2011.

[2] ITA-AITES WG19, 2009. General Report on Conventional Tunnelling Method.

[3] ITA-AITES WG5, 2011. Safe working in tunnelling. For tunnel workers and first line supervision.

[4] EN 1997-1: Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali

[5] D.M. 17 gennaio 2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni

[6] Lunardi, P. (1995). Fibre-glass tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils. Materials Engineering, 1995, Vol. 6, No. 1-2, 107-165.

[7] Lunardi, P. (1997). Aspetti progettuali e costruttivi della galleria “Vasto”. Quarry and Construction, 8

[8] Martel J., Roujon M., Michel D. (1999). TGV Méditerranèe - Tunnel de Tartaiguille: méthode pleine section”, Proceedings of the International Conference on “Underground works: ambitions and realities”, Paris.

9] Piredda S. (2014) I benefici delle Note Interregionali in termini di tutela della salute. Atti Workshop Nazionale NIR 2013 – Note Interregionali di Ingegneria della Sicurezza nello scavo di gallerie. Bologna 4-5 Luglio 2014, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, AMS Acta, p. 63-77, ISBN: 9788898010202.

[10] Batyrev N., Nevleva T. (2015). The first on-site comparison between NATM and ADECO-RS during construction of the “Dubler Kurortnogo prospekta” tunnels in Sochi (Russia). Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress WTC 2015, Dubrovnik, Croatia, 2015, 22nd – 28th May. Promoting Tunneling in SEE Region. ISBN 978-953-55728-5-5

[11] Lunardi P. (2008). Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS). Berlin: Springer.

[12] Lunardi P. (2015). Il controllo dell’estrusione del nucleo di terreno al fronte d’avanzamento come strumento di stabilizzazione per la cavità. Muir Wood Lecture at the ITA/AITES World Tunnel Congress on "Promoting tunnelling in see region”, Dubrovnik, 22-28 maggio 2015

[13] Lunardi P. (2016). Evolution of design and construction approaches in the field of tunnelling: the results of applying ADECO-RS when constructing large underground works in urban areas. ACUUS 2016, 15th World Conference, San Pietroburgo 12-15 settembre 2016

[14] U.S. Department of Commerce, 1960. Some essential safety factors of tunnelling. Bulletin 439, bureau of Mines, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

[15] Eskesen S.D., Tengborg P., Kampmann J., Veicherts T. H. (2004). Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2, Tunnelling and Underground Space Technology, 19, (3): 217-237.

[16] BS 6164:2011. Code of Practice for Health and Safety in Tunnelling in the Construction Industry.

[17] Legge 11 febbraio 1994, n. 109. Legge quadro in materia di lavori pubblici (Legge Merloni).

[18] Decreto Legislativo 19 settembre 1994, n. 626. Attuazione delle direttive 89/391/CEE, 89/654/CEE, 89/655/CEE, 89/656/CEE, 90/269/CEE, 90/270/CEE, 90/394/CEE, 90/679/CEE, 93/88/CEE, 95/63/CE, 97/42, 98/24 e 99/38 riguardanti il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori durante il lavoro.

[19] Decreto Legislativo n. 494, 1996.

[20] Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81. Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.

[21] Conferenza delle Regioni e delle province Autonome (2007). Linee Guida per il Coordinamento della Sicurezza nella realizzazione delle Grandi Opere

[22] N.I.R. 37: Sicurezza della fase di scavo (2008). NOTA INTERREGIONALE PROT. N° PG/2008/76500 del 20/03/2008 “Linee guida per la sicurezza della fase di scavo in gallerie realizzate con tecnica tradizionale”

[23] N.I.R. 41: Lavori a ridosso del fronte (2009). NOTA INTERREGIONALE PROT. N° PG/2009/272843 del 27/11/2009 “Standard di sicurezza contro il rischio di infortunio da caduta gravi nei lavori a ridosso del fronte di gallerie scavate con tecnica tradizionale”

[24] N.I.R. 43: Lettera Az. USL di Bologna e Az. USL 10 di Firenze Prot. n° 8333 del 24/01/2011 “Aspetti applicativi della NIR n° 41 ‘Lavori a ridosso del fronte’ ”

[25] N.I.R. 45 del 6/06/2014: “Lavori a ridosso del fronte” – Addendum

[26] Lunardi P., Cassani G., Gatti M., Bellocchio A., Zenti C.L. (2019). Life safety applied in full face excavation. In: Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress WTC 2019, Naples, Italy, 2019, 3rd – 9th May. Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art – Peila, Viggiani & Celestino (Eds). © 2019 Taylor & Francis Group, London, pp. 4921-4931. ISBN 978-1-138-38865-9

[27] Lunardi P. (2000). “Tunnelling under the Via Appia Antica in Rome”, Tunnels & Tunnelling International, 2000 (4)

[28] Batyrev N. (2016). Two Tribes. Tunnels and Tunnelling, 2016 (12): 28-34.

[29] Wang W. (2017). Comparison between Analytical Method and New Austrian Method for Controlling Deformation of Rock and Soil. Universe Scientific Publishing, Volume 6, Issue 1, 2017.

[30] Lunardi G., Cassani G., Gatti M, Lodigiani G. (2018). ADECO & NATM comparison: the case of Višňové Tunnel. Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress WTC 2018, Dubai, Italy, 2018, 20th – 26th April. The Role of Underground Space in Building Future Sustainable Cities

[31] HSE - Health and Safety Executive (1996). Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels, The National Archives, Kew, London TW9 4DU, First published 1996 ISBN 978 0 7176 1068 6, reissued as PDF 2014