

*L'approccio Prevention through Design - PtD
Per la valutazione del rischio negli scavi in gallerie*

Sistemi di ventilazione nelle attività cantieristiche in sotterraneo: aspetti di sicurezza e salute del lavoro

Mario Patrucco¹, Fargione Paolo¹, Maida Luisa¹, Maria Gabriella Pregolato²

¹ Politecnico di Torino - Dept. of Environment, Land and Infrastructure Engineering (DIATI)

² ASL TO3 S.Pre.S.A.L.

Mail: d000833@polito.it

RIASSUNTO

Le attività per la realizzazione di opere in sotterraneo costituiscono un aspetto rilevante, ancora oggi in forte crescita, stante il continuo sviluppo nei paesi dell'Unione Europea di reti di comunicazione e trasferimento di persone, beni e servizi, e risultano di particolare interesse a livello Nazionale date le caratteristiche morfologiche del territorio.

Le tematiche associate agli aspetti di Sicurezza e Salute del lavoro, OS&H, assumono particolare importanza nelle attività in sotterraneo, caratterizzate da marcate peculiarità, tra cui limitatezza di spazi, compresenza di molteplici attività nella zona di avanzamento, difficoltà di illuminazione, comunicazione, ecc.

In questi scenari diviene dunque a maggior ragione fondamentale un rigoroso approccio in Valutazione e Gestione dei Rischi, unico in grado di guidare a scelte valide in materia di tecniche e tecnologie operative ed in generale nella gestione delle condizioni ambientali: si possono così ottenere risultati economicamente soddisfacenti - un fermo d'avanzamento in galleria comporta costi anche ampiamente superiori a 100k €/giorno (valore indicativo per scavo di una galleria con diametro di 8 m tramite Tunnel Boring Machine aperta) - e efficace tutela delle condizioni di OS&H dei lavoratori impegnati nella realizzazione dell'opera, nonché dei futuri fruitori, manutentori, ecc.

Di non secondaria importanza è anche la considerazione che gli inquinanti generati dalle attività di scavo sono destinati, in mancanza di opportune contromisure, ad impattare sull'ambiente esterno, al pari di altri possibili impatti quali vibrazioni, cedimenti indotti in superficie, ecc. Le citate problematiche costituiscono certamente nel loro insieme tema di studio ed approfondimento nell'ambito del corso di laurea in Tecniche della Prevenzione nell'Ambiente e nei Luoghi di Lavoro e delle tesi applicative derivanti.

Ci si propone qui di focalizzare l'attenzione su uno degli aspetti del problema della gestione della sicurezza nelle opere in sotterraneo in corso di realizzazione, ovvero un'efficace progettazione e gestione dei sistemi di ventilazione.

TAKE HOME MESSAGE

1. *L'importanza sistemi di ventilazione per la gestione delle condizioni igienico ambientali nei luoghi di lavoro sotterranei, e delle emissioni verso l'esterno;*
2. *La progettazione necessariamente fondata su accurate Valutazioni di Rischio – secondo l'approccio in PtD e la gestione in corso d'opera dello scavo;*
3. *La progettazione deve rendere l'impianto di ventilazione nel suo insieme in grado di far fronte anche a situazioni di emergenza;*
4. *Il piano dovrà contenere soluzioni finalizzate a garantire il grado di disponibilità desiderato.*

ABSTRACT

The underground operations constitute an aspect of great importance, which is raising rapidly, given the continuous development in the European Union countries of networks to transfer people and goods; moreover, they are particularly interesting at the National level given the morphological characteristics of our territory.

The topics concerning Occupational Safety and Health - OS&H aspects take on particular relevance in underground excavation activities, since characterized by accentuated peculiarities, including limited space, presence of multiple activities in the working area, critical conditions of lighting, communication, etc.

Hence, a rigorous approach in Risk Assessment and Management becomes here fundamental, and it is the only option able to lead to well-founded choices regarding operating techniques and technologies and, more broadly, on the management of environmental parameters in underground works: in this way it is possible to obtain economic benefits (an unexpected stoppage can cause a direct economic loss up to more than 100 k€/d - est. value for an 8 m diameter open Tunnel Boring Machine operation) and effective preservation of the OS&H conditions of the workers involved in the completion of the infrastructure, as well as future users, maintainers, etc.. Of not subordinate importance is also that all the pollutants generated by excavation activities, in absence of appropriate countermeasures, are bound to have important negative repercussions on the external environment, like other possible impacts such as vibrations, subsidence induced a surface, etc.

The aforementioned problems certainly constitute a subject of study and investigation in the first level degree course in Environment and Workplace Prevention Techniques, and the resulting application final dissertations.

This paper aims to focus the attention on one of the issues of the safety management in underground works, i.e. an effective design and management of ventilation systems.

INTRODUZIONE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

Per garantire adeguate condizioni di sicurezza e salute dei lavoratori è certamente necessario adottare tecniche e tecnologie di conduzione dei lavori le più confacenti ed aggiornate. In altre parole, coerentemente con quanto previsto nella Direttiva quadro Europea 89/391/EEC sin dalla premessa generale¹, e nel recepimento nazionale aggiornato D.Lgs. 81/08 e smi² art.15, c.1 con riferimento alle lettere da b) a d), occorre seguire un approccio in Prevention through Design - PtD. Tale approccio, promosso dal 1995 dal National Institute for Occupational Safety and Health – NIOSH³, si basa sul seguente concetto ovviamente derivato dai principi di una rigorosa^A Valutazione e Gestione dei rischi: *includere gli aspetti di sicurezza e salute sul lavoro tra i parametri di input nel processo di progettazione al fine di prevenire o minimizzare i rischi lavoro-correlati relativi alla costruzione, produzione, uso, manutenzione e smaltimento di strutture, materiali e attrezzature.*

Concetto pienamente coerente con quanto nella Direttiva 89/391/EEC, nonché, nel nostro ordinamento, in art. 2087 del Codice Civile.

L'approccio in PtD si presenta peraltro di non semplice attuazione proprio nel caso delle attività di scavo in sotterraneo, in quanto si ha a che fare con materiali le cui caratteristiche non possono essere definite a priori con un grado di dettaglio comparabile a quello normalmente disponibile per la progettazione di componenti meccanici. Occorre comunque anzitutto garantire le condizioni macro-statiche del sotterraneo, il che introduce la necessità di *progettazione dinamica*, ovvero di adottare tecniche e tecnologie che possano in larga misura adeguarsi almeno alle varie classi di scavo ipotizzabili, e di prevedere espliciti *limiti di confidenza* riconoscibili in modo speditivo, nel cui ambito le ipotesi progettuali mantengono validità (ciò vale ovviamente anche per assicurare efficienza operativa al sistema⁶).

Del pari le particolari problematiche di OS&H tipiche delle attività in sotterraneo (Tab.1) vanno tenute in conto in tutte le decisioni di progressivo affinamento progettuale, per condizioni operative normali e nei prevedibili scenari di emergenza.

^A Basata su tecniche formalizzate^{4,5}

	Criticità	Possibili conseguenze associate
Dovute a cause naturali	Condizioni geomeccaniche più o meno difficili.	<i>Cedimenti o crolli massivi o di porzioni localizzate (date le attuali sezioni, che possono raggiungere e superare i 100 m², anche elementi di modeste dimensioni possono costituire un importante fattore di pericolo), colpi di tensione,</i>
	Gas di formazione: grisù, radon, anidride solforosa,	<i>Esplosioni, intossicazioni (asfissia, avvelenamento), alterazioni nel funzionamento dei motori,</i>
	Temperatura (caldo, associato al gradiente geotermico; talora freddo, in caso di presenza di acqua).	<i>Stress da caldo, difficoltà di raffreddamento delle macchine, alterazioni del flusso d'aria naturale.</i>
	Sostanze nocive contenute nelle rocce (agenti fisici, chimici, cancerogeni...).	<i>Malattie lavoro correlate.</i>
	Acqua di formazione.	<i>Instabilità generali o localizzate, irruzioni di acqua.</i>
Dovute alle operazioni di scavo	Roccia, materiale di rivestimento temporaneo.	<i>Cadute di materiali dall'alto (in particolare elementi di sostegno con o senza porzioni di roccia).</i>
	Gas, fumi e vapori: scarichi di mezzi a combustione interna, uso di esplosivi, operazioni varie (e.g. taglio e saldatura): CO, CO ₂ , NO _x , SO _x , IPA, ecc..	<i>Esplosioni, incendi, intossicazioni (ipossia, avvelenamento);</i>
	Polveri associate alle operazioni di abbattimento e movimentazione.	<i>Esplosioni, malattie lavoro correlate, problemi di visibilità,</i>
	Temperatura: caldo, dovuto a macchine ed installazioni ed operazioni varie (e.g. taglio e saldatura).	<i>Stress da caldo, difficoltà di raffreddamento delle macchine, alterazioni del flusso d'aria naturale, innesco di incendi ed esplosioni.</i>
	Carburanti, lubrificanti, pneumatici, cavi,	<i>Carico di incendio.</i>

Tab. 1: criticità associate agli inquinanti in sotterraneo

Dunque, per la Analisi dei Rischi e per la conseguente scelta delle soluzioni di Prevenzione nella successiva fase di gestione, risulta necessaria fin dalle prime fasi di progettazione una conoscenza approfondita degli inquinanti di formazione e delle loro caratteristiche in termini di mobilità e variabilità di distribuzione nelle formazioni rocciose da attraversare.

Possiamo a questo riguardo distinguere sostanze:

- *mobili*: grisù e altri gas contenuti nell'ammasso roccioso, particelle nocive, solidi solubili veicolati da venute d'acqua di formazione (es. radon), ecc.;
- *solidali con l'ammasso roccioso*: amianto, silice, minerali radioattivi, ecc.

Queste ultime possono presentarsi con una distribuzione più o meno prevedibile all'interno del litotipo: i minerali radioattivi e la silice mostrano di solito una distribuzione piuttosto uniforme, trattabile in termini geostatistici, mentre l'amianto non ha una distribuzione prevedibile e spesso si presenta come "vene" o mostra un tipico effetto pepita (*nugget effect*)⁷.

D'altra parte è ovvio che il rigore con cui ci si deve porre nei confronti dei vari inquinanti va definito in funzione di una serie di caratteristiche (Tab. 2).

<p>CONSEGUENZE DOVUTE ALLA PRESENZA DELL'INQUINANTE:</p> <ul style="list-style-type: none"> • possibili conseguenze sugli esposti vs concentrazione/livello ad evoluzione rapida o lenta; • possibili altri scenari associati: <ul style="list-style-type: none"> – incidenti/infortuni diretti (es. esplosione, alterazioni di risposta di motori o dispositivi di controllo numerico, ecc.); – incidenti/infortuni indiretti (es. a seguito di abbagliamento, difficoltà visiva, mancata ricezione di allarmi, ecc.).
<p>CARATTERISTICHE PROPRIE DELL'INQUINANTE EMESSE IN TERMINI DI:</p> <ul style="list-style-type: none"> • capacità di dispersione in porzioni di ambiente più o meno estese; • rapidità di dispersione; • caratteristiche di permanenza nell'ambiente; • eventuale tendenza alla segregazione temporanea o definitiva (ad esempio in funzione della massa volumica, della miscibilità con l'aria, ecc.); • eventuale tendenza ad evolvere in termini di natura chimica (ad es. per ossidazione); • eventuale tendenza ad aggregazione, flocculazione, ecc.; • tensione superficiale (bagnabilità) ed igroscopicità; • effetti di tipo elettrico;
<p>CARATTERISTICHE DELLA SORGENTE IN TERMINI DI:</p> <ul style="list-style-type: none"> • stazionarietà o mobilità; • caratteristiche spaziali proprie (da semi puntuale ad estesa, al limite ubiquitaria); • caratteristiche spaziali di emissione (ad es. direttività); • caratteristiche temporali dell'emissione (continua, ciclica, discontinua, occasionale);
<p>CARATTERISTICHE DELL'AMBIENTE INTERESSATO IN TERMINI DI:</p> <ul style="list-style-type: none"> • presenza di correnti d'aria; • altri parametri condizionanti la dispersione o propagazione dell'inquinante; • variazioni stagionali;
<p>CARATTERISTICHE DEI SOGGETTI ESPOSTI:</p> <ul style="list-style-type: none"> • espositive (in termini di fattore di contatto ⇔ aspetti di organizzazione del lavoro in posizione e durata); • soggettive (sensibilità all'inquinante);
<p>ALTRI FATTORI DI PERICOLO IN TERMINI DI:</p> <ul style="list-style-type: none"> • compresenza di inquinanti ed eventuali effetti sinergici; • veicolabilità di altre sostanze nocive (es. particelle carboniose da combustione ed Idrocarburi Policiclici Aromatici);

Tab. 2: principali parametri da considerare per la gestione delle condizioni ambientali nei luoghi di lavoro

Per quanto riguarda poi la logica di Prevenzione, anche secondo il già citato art.15, c.1 lettere da e) a g) del D.Lgs. 81/08 e s.m.i., è da considerare che l'attuazione delle differenti misure di prevenzione deve seguire un ben definito ordine gerarchico, ai fini di una corretta Gestione dei rischi:

Misura di Prevenzione a priorità 1. Interventi sul fattore di pericolo

Impiego di materie prime NON (o meno) atte ad emettere inquinante, ed eventuale adozione di pretrattamenti: nello scavo di gallerie ciò comporterebbe raramente attuabili variazioni di tracciato, od interventi al momento ipotizzabili solo a livello teorico;

Misura di Prevenzione a priorità 2. Interventi sulla formazione di inquinanti

Scelta a livello progettuale di soluzioni impiantistiche, macchine e procedure atte a limitare la formazione od il trasferimento degli inquinanti dall'ammasso all'area di cantiere, ed accurata manutenzione: nel nostro caso la adozione di tecniche e tecnologie di abbattimento finalizzate a limitare al minimo le sovra-macinazioni (e.g.

privilegiando alcune soluzioni di abbattimento meccanico all'utilizzo di esplosivo) può ridurre la presenza di fini nel fuso granulometrico, ovvero la generazione di particolati aero-disperdibili^B, mentre una contropressione al fronte può contenere l'entità delle venute di gas;

Misura di Prevenzione a priorità 3. Interventi sulla dispersione nell'ambiente di lavoro

Cattura immediata al punto di emissione, confinamento fisico ed asportazione: nel nostro caso sono da privilegiare le tecniche di abbattimento meccanico a camera chiusa (macchine a contropressione di terra EPB - Earth Pressure Balance o macchine scudate tipo Hydroshield, o ad irrorazione continua degli utensili (Continuous Miner), rispetto all'impiego di esplosivo o di High Energy Hydraulic Hammer - HEHH in cui le predette azioni di cattura immediata, confinamento ed asportazione sono affatto o scarsamente gestibili^B;

Misura di Prevenzione a priorità 4. Interventi sull'ambiente di lavoro

Riduzione per diluizione delle concentrazioni di inquinante nei luoghi di lavoro, ed asportazione dell'aria inquinata: nel nostro caso impianti di ventilazione del sotterraneo. La corretta attuazione di quanto detto ai punti precedenti assume fondamentale importanza per limitare le portate (ed i corrispondenti costi), e l'efficacia e la sicurezza sono fortemente condizionate dalle scelte progettuali tecnico impiantistiche, che devono assicurare le migliori prestazioni sia in condizioni operative normali sia in caso di emergenza (ad es. un decadimento a seguito di guasto della contropressione favorisce la venuta di gas di formazione).

Misura di Prevenzione a priorità 5. Interventi per la salvaguardia della salute dei lavoratori

Telecomando e telecontrollo da apposite cabine o dall'esterno: nel nostro caso allo stato attuale si dispone di attrezzature e macchine gestibili da cabine "pulite", l'obiettivo essendo, secondo la European Construction Technology Platform⁹, pervenire ad una situazione, auspicata per gli anni 2030, in cui "the safety of underground constructions will be improved in order to achieve two mainly important goals: no workers inside tunnels, and zero accidents".

A quanto precede possono essere associati Dispositivi di Protezione Individuale – DPI (maschere, cuffie, ecc.), qualora, per dimostrata impossibilità tecnica o nelle more di una soluzione definitiva, permangano condizioni non soddisfacenti: ove la situazione risulti tale è ovvio -oltre che obbligatorio- che i lavoratori si avvalgano di tali strumenti in modo sistematico ed appropriato^C.

Nel presente lavoro si focalizzerà l'attenzione sui sistemi di ventilazione, non senza ribadire che questi si inseriscono nell'ordine logico delle azioni di Prevenzione solo al punto 4, ovvero dopo che le azioni di cui ai punti precedenti abbiano trovato, per quanto fattibile alla luce del progresso delle tecniche e delle conoscenze, completa attuazione.

MATERIALI E METODI

Lo scopo della ventilazione in sotterraneo è chiaramente duplice: anzitutto si tratta di alimentare tutti i luoghi di lavoro del sotterraneo – in cui si svolgono operazioni primarie ed accessorie- con apporto di aria pulita in quantità sufficiente a garantire condizioni igienico ambientali confacenti in materia di percentuale di ossigeno e concentrazioni di inquinanti, tenuti ovviamente anche in debita considerazione gli aspetti di comfort legati alle condizioni microclimatiche (temperatura, umidità, velocità dell'aria).

Ad esempio, nel caso di gas esplosibile, la concentrazione deve essere mantenuta al di sotto di una certa percentuale del Lower Explodible Limit – LEL, e per altre fonti di inquinamento chimico (cancerogeno) al di sotto di riconosciuti limiti di esposizione (Occupational Exposure Limits – OEL) o, volendo, riferimenti tecnici autorevoli. Altro scopo è la rimozione dell'aria inquinata ed il suo trasferimento verso l'esterno, previo pretrattamento ove necessario: trattandosi di una emissione dovrebbe infatti valere quanto in D.Lgs.152/06¹², parte quinta^D.

^B La quantità di polvere generata dipende dalle proprietà meccaniche e fisiche della roccia: fragilità, durezza, contenuto di umidità e porosità¹⁰, e dai diversi gradi di alterazione e fratturazione.

^C Per quanto riguarda i DPI, va segnalata l'attuale tendenza a valutare l'esposizione tenendo conto del fattore di protezione da essi garantito, e ad ammetterne l'utilizzabilità anche per archi di tempo consistenti, mutuando l'approccio formalizzato ad emendamento di quanto previsto nel D.Lgs 277/91 per il rumore. Ciò comunque sempre nel rispetto dei concetti gerarchici sopra esposti, esplicitamente richiamati anche nella norma UNI EN 529:2006¹¹.

^D con particolare riferimento al c.4, lett.a, art.269

PRINCIPALI SCHEMI DI VENTILAZIONE DI GALLERIE E ASPETTI POTENZIALMENTE CRITICI		
SCHEMI DI VENTILAZIONE (ovviamente l'impiego di condotte flessibili è possibile solo ove siano percorse da fluido a pressione maggiore della press. esterna)		ZONE POTENZIALMENTE CRITICHE nella situazione in esame
<p>1. Galleria a doppia canna (o con galleria di servizio) con sistema di ventilazione monoflusso. Il flusso d'aria può essere invertito in funzione del tratto di galleria in avanzamento.</p> <p>E' possibile l'impiego di acceleratori di flusso senza condotti: l'aria inquinata viene convogliata all'esterno direttamente dal portale di una delle due canne; ciò costituisce una emissione non gestibile. Deve essere previsto un sistema di ventilazione secondario, in prossimità del fronte per prevenire zone di ristagno di aria inquinata.</p>		<p>La zona critica (inquinata) si estende a tutta la galleria di riflusso ed al tratto della galleria in fase di scavo, oltre l'ultimo by-pass.</p> <p>Nota. Occorre garantire l'efficace tenuta delle doppie porte installate sui by-pass chiusi.</p>
<p>2. Ventilazione biflusso di tipo preme</p> <p>E' lo schema più semplice ed economico. Il sistema è strutturato in modo tale da portare l'area di lavoro in sovrappressione rispetto al punto di prelievo (aspirazione) dell'aria. L'aria inquinata costituisce emissione non gestibile verso l'esterno.</p>		<p>La zona da considerare critica si estende a tutta la galleria (l'estensione dell'area inquinata è massima).</p>
<p>3. Ventilazione biflusso di tipo aspirante con condotto in depressione</p> <p>E' necessario un condotto rigido ed un booster per rimuovere gli inquinanti in prossimità del fronte. E' essenziale gestire le sorgenti secondarie lungo la galleria.</p>		<p>La zona da considerare critica si estende dal fronte fino all'imbocco del condotto di aspirazione (L) e per una lunghezza X (funzione delle portate e delle caratt. di diffusione dell'inquinante).</p> <p>Nota. Eventuali falle nel condotto in depressione comporterebbero il decadimento della capacità di aspirazione.</p>
<p>4. Ventilazione biflusso di tipo aspirante con condotto in pressione</p> <p>Può essere utilizzato un condotto flessibile. L'attuatore principale è collocato in sotterraneo non lontano dal fronte (sono necessari alcuni tratti di condotto rigido). E' richiesto un booster per la rimozione degli inquinanti in prossimità del fronte. E' essenziale gestire le sorgenti secondarie lungo la galleria.</p>		<p>La zona da considerare critica ha estensione pari a quella del caso precedente.</p> <p>La posizione dell'attuatore può causare problemi in caso di emergenza (l'attuatore può venire danneggiato).</p> <p>Nota. Eventuali falle nel condotto in pressione comporterebbero re immissione di aria inquinata nel cavo.</p>
<p>5. Ventilazione biflusso a doppio condotto</p> <p>QUESTO LAYOUT DI VENTILAZIONE E' FORTEMENTE CONSIGLIATO</p> <p>E' possibile, mediante l'impiego di ventilatori a portata regolabile, gestire l'estensione della zona potenzialmente critica (inquinata) e l'emissione verso l'ambiente esterno. Entrambi gli attuatori sono posizionati all'esterno della galleria.</p> <p>E' essenziale gestire le sorgenti secondarie lungo la galleria.</p>		<p>In funzione della portata del sistema aspirante Q_e e del sistema preme Q_b, la zona critica si estende:</p> <p>⇔ come raffigurato se $Q_e > Q_b$</p> <p>⇔ come raffigurato se $Q_e \leq Q_b$</p> <p>Nota. Situazione molto particolare che richiede attuatori reversibili (oltre che entrambi i condotti rigidi) - tale configurazione NON permette di gestire l'emissione ma può essere utilizzata per accelerare le operazioni di sfumo.</p>
<p>6. Ventilazione monoflusso tramite cunicolo pilota COMPLETATO</p> <p>E' possibile, mediante attuatori a portata regolabile, una gestione della estensione della zona inquinata e delle emissioni verso l'ambiente esterno; gli attuatori sono collocati all'esterno della galleria. E' essenziale gestire le sorgenti secondarie lungo la galleria.</p>		<p>L'area di lavoro inquinata risulta minimizzata.</p> <p>Nota. Il cunicolo pilota fornisce informazioni geologiche e geotecniche. Nessun accesso al cunicolo deve essere consentito, se non per cause eccezionali.</p>

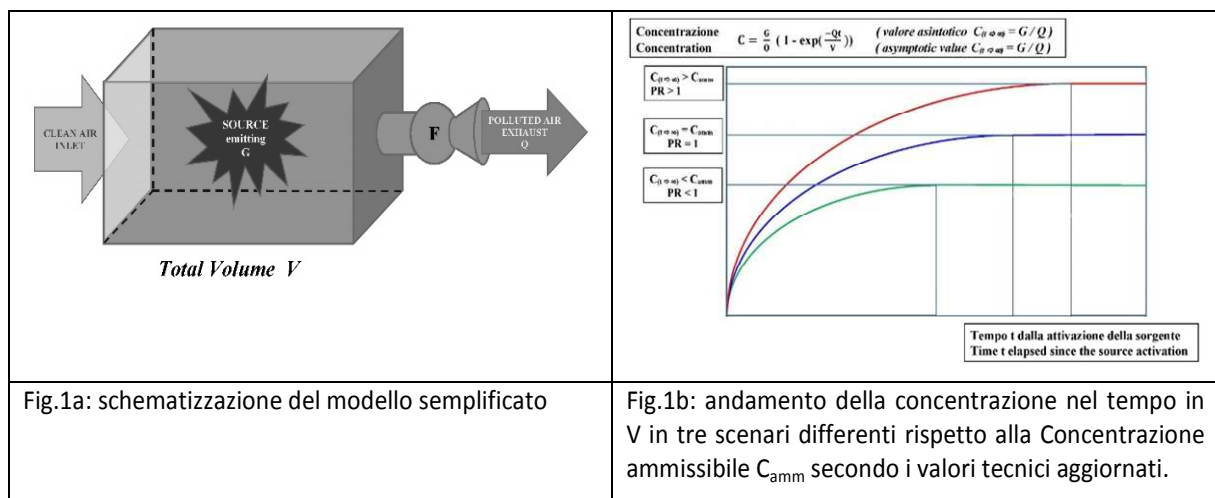
Tab. 3: principali schemi di ventilazione di gallerie ed aspetti potenzialmente critici (nel caso di lavorazioni accessorie lungo il cavo (apertura di nicchie, camere, ecc.) occorre derivare aria dal flusso principale di aria pulita; il riflusso avrà luogo unitamente all'aria proveniente dalle altre lavorazioni).

A: primo passo progettuale: occorre anzitutto procedere alla definizione, da approccio in Valutazione e Gestione dei Rischi, del layout generale dell'impianto: al riguardo valgono le considerazioni compendiate in Tab.3

B: secondo passo progettuale: definito il layout generale, il parametro essenziale per la progettazione di un sistema di ventilazione è la definizione della portata d'aria Q necessaria per gestire gli inquinanti, in funzione della portata di emissione della sorgente G e delle concentrazioni raggiunte C . La relazione fra le tre grandezze può essere stimata in prima approssimazione tramite il modello schematizzato in Fig.1a: all'interno di un generico ambiente di volume V caratterizzato da una parete aperta, è posizionata una sorgente che genera una portata di inquinante G ; un attuatore F genera un flusso di aria pulita entrante dalla apertura.

Nelle ipotesi semplificative che:

- Il contaminante si diffonda nell'ambiente con miscelazione spazio-temporale perfetta,
- l'efficienza dell'aspirazione non risenta di particolari caratteristiche del contaminante,
- vi sia un'unica sorgente a portata costante,
- non si vi siano altre cause di perturbazione dei flussi, la evoluzione della concentrazione di inquinante in V in funzione del tempo con sorgente ed attuatore operativi è riportata in Fig.1b.



In Fig.1b si può identificare una fase di transitorio durante la quale la concentrazione cresce fino a raggiungere

$$C_m = \frac{G}{Q} [Kg / m^3]$$

l'asintoto, individuando la massima concentrazione per flusso stazionario C_m :

Ne risulta che in condizioni stazionarie l'entità di V non influenza C_m e dunque deve essere presa in considerazione solo per il calcolo della evoluzione della concentrazione durante il transitorio.

In Fig.1b sono riportati 3 differenti andamenti della concentrazione accettabili o meno sulla base del rapporto tra la frequenza attesa di accadimento degli eventi dannosi nella situazione in esame e la minima frequenza di accadimento in una situazione di rispetto della normativa aggiornata (PR)¹³:

- curva rossa - 1: con la portata adottata C_m risulta superiore al valore limite o riferimento tecnico per l'inquinante in questione. Ciò indica una situazione che necessita di interventi correttivi (PR >1);
- curva blu - 2: situazione "limite" di rispetto delle indicazioni di cui sopra (PR=1) in cui C_m è pari al limite o riferimento tecnico;
- curva verde - 3: situazione in cui il valore di C_m risulta inferiore al limite o riferimento tecnico (PR <1).

Con particolare riferimento alle attività in sottoterraneo normalmente si procede attraverso la formulazione di ipotesi sulle portate di ingresso degli inquinanti di formazione G : nel caso di gas esplosibile queste sono valu-

tate in base a determinazioni strumentali di valori di pressione di formazione e stime sullo stato di fratturazione delle rocce, mentre ad es. nel caso di impiego di motori a combustione interna nel sotterraneo ci si può avvalere di relazioni empiriche che legano la portata di aria richiesta alle potenze installate, tenuti in conto i coefficienti di contemporaneità¹⁴.

Naturalmente una siffatta stima di G fornisce una indicazione di larga massima del valore di Q necessario per una corretta diluizione degli inquinanti, che andrà validata con misurazioni dirette delle concentrazioni reali, in base alle quali regolare poi le effettive portate degli attuatori. Giova al riguardo sottolineare che tali determinazioni devono fondarsi su un rigoroso approccio in termini di rappresentatività dei campioni, come pure le eventuali derivanti valutazioni di esposizione dei lavoratori^{15,16,17}.

Sempre in fase di progettazione, definita la portata richiesta, si può procedere ad un primo speditivo dimensionamento dei componenti base dell'impianto (condotte, attuatori, ecc.) nell'ipotesi semplificativa ed accettabile esclusivamente in assenza di significative variazioni di volume del fluido per temperatura e pressione.

Prima di procedere per questa via è peraltro da sottolineare che attribuire all'aria le caratteristiche di fluido incompressibile vale ovviamente solo in primissima approssimazione, e l'iter di calcolo prosegue, in caso di cambiamenti di quota, inserendo fattori correttivi; questo approccio è però assolutamente inadeguato ad analizzare compiutamente la questione e tanto meno scenari di incendio in sotterraneo, casi in cui non si può prescindere dalla adozione di modelli CFD^{18,19}.

Nell'ipotesi semplificativa di cui sopra ci si può avvalere della relazione:

$$\Delta P = R * Q^2$$

dove la resistenza aerodinamica R è calcolata secondo la equazione di Atkinson:

$$R = \frac{\Delta p}{Q^2} = k * L * \frac{\text{Per}}{A^3} \left[\frac{\text{Ns}^2}{\text{m}^8} \right]$$

Si può poi procedere avvalendosi della analogia "elettrica"^E pervenendo alla definizione del diametro dei condotti (come compromesso ragionato fra resistenza aerodinamica ed ingombro degli stessi) ed al dimensionamento di massima degli attuatori oggi ampiamente regolabili nelle loro prestazioni, ponendo peraltro la necessaria cura ai seguenti aspetti:

la portata Q deve essere scelta tenuto conto delle eventuali situazioni anomale che si prevede di dover fronteggiare;

la reale sezione di passaggio d'aria nel cavo è sovente molto diversa dalla sezione dello stesso a causa di ingombri localizzati o distribuiti che possono assumere incidenza rilevante sul risultato.

C: ad integrazione di quanto precede, la progettazione di un sistema di ventilazione deve contemplare:

a) sistemi di monitoraggio, tanto più complessi quanto più critico è l'inquinante da trattare, e quanto meno dettagliata risulta la valutazione di prevedibilità della sua potenziale presenza nell'atmosfera dei luoghi di lavoro. Un ruolo determinante giocano al riguardo le soluzioni tecnologiche in grado prevedere e rilevare in modo tempestivo le variazioni nelle condizioni di inquinamento (la situazione è ad oggi diversificata, ad es. con riferimento alla presenza di gas o di particolati specifici). Si veda a titolo di esempio la discussione relativa al potenziale inquinamento da fibre di amianto proposta²⁰: il diagramma di Fig.2, risultante da Event Tree Analysis – ETA, evidenzia i tempi di risposta degli accertamenti attuabili a situazione di inquinamento in atto (i.e. a pericolo *attivo*) con esposizioni di alcuni ordini di grandezza superiori ai riferimenti tecnici, ed emissione incontrollata di fibre che semplici calcolazioni permettono di stimare in oltre **10¹⁴**;

^E L'analogia elettrica consente di gestire sistemi semplici di parallelo o serie di resistenze aerodinamiche; peraltro essa non è agevolmente estendibile a sistemi magliati tipici di miniera, per i quali, anche conservando la semplificazione di attribuire all'aria caratteristiche di fluido incompressibile, le calcolazioni basate su approcci iterativi si presentano decisamente articolate.

Presence of asbestos mineral in the rock formation	Identification through visual analysis on the drilling material	Identification through analysis on the face and walls of the tunnel	Identification through personal or stationary sampling	Delay between time for obtaining results and the excavation progress
	YES			No uncontrolled dispersion
		YES		Uncontrolled dispersion of about 5 hours
	NO		YES	Uncontrolled dispersion superior to 5 hours
		NO		

Fig. 2: Event Tree Analysis – ETA relativa allo shift temporale tra la disponibilità dei risultati delle misurazioni di inquinante e l’avanzamento dello scavo (nell’assunzione ottimistica che campionamenti e dispersione di inquinante inizino contemporaneamente).

b) sistemi di controllo: i dati raccolti dai sistemi di monitoraggio, unitamente ad informazioni sui parametri di funzionamento (portate nei condotti, prevalenza degli attuatori, condizioni di intasamento dei separatori, parametri elettrici)²¹ costituiscono input a PLC che, tramite sotto sistemi, regola la prestazione dell’attuatore per soddisfare le esigenze contingenti di diluizione degli inquinanti. Il sistema è altresì in grado di gestire segnalazioni ed allarmi, oltreché, tramite logica di autodiagnosi, eventuali situazioni anomale di funzionamento;

c) valutazioni di disponibilità dell’intero sistema, di rigorosità coerente con le conseguenze stimate di una deviazione (dalla mancanza di adeguate portate, che quanto meno comporta interruzione delle lavorazioni, sino a scenari di esplosione di gas).

In Fig. 3 si propone a titolo di esempio il risultato di una analisi comparata²¹ di disponibilità di sistemi di ventilazione premente e biflusso a doppio condotto (schemi 2 e 5 di Tab.3 rispettivamente):

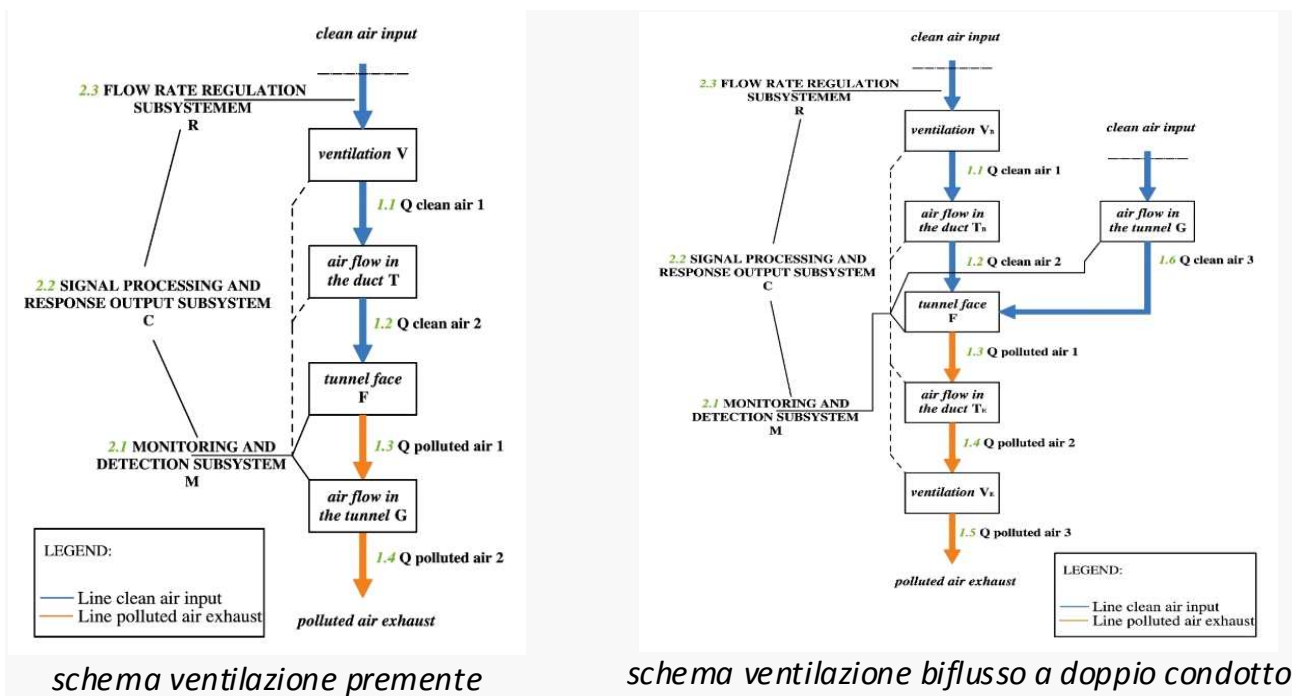


Fig. 3: schematizzazione per analisi di disponibilità di sistemi premente e biflusso a doppio condotto

Applicando una Hazards and Operability Analysis - HaZOP si ricava quindi il Top Event: *formazione di atmosfera esplosibile (concentrazione di grisù superiore al LEL) non contrastata dalla ventilazione*.

Si può concludere, tramite Fault Tree Analysis – FTA, che il layout di ventilazione a doppio flusso conserva prestazione, seppur ridotta, anche in caso di mancato funzionamento del ramo di mandata: in questo caso la depressione al fronte richiama aria lungo la galleria assicurando ancora al fronte un certo livello di diluizione degli inquinanti, ma può favorire la immissione di gas di formazione nel cavo. Parimenti, un guasto nel ramo di aspirazione riconduce allo scenario di sola ventilazione premente, con diluizione parziale degli inquinanti e sovrappressione nel cavo.

Peraltro, in caso di guasto dei sottosistemi di monitoraggio e rilevamento, o di malfunzionamento dei sistemi di elaborazione dei segnali o pilotaggio degli attuatori, od ancora di un guasto di questi ultimi o nelle condotte, la sicurezza decade con entrambi i layout di impianto: da qui la necessità prioritaria di adottare contromisure tecniche per questo tipo di deviazioni in fase progettuale.

E dunque, coerentemente con quanto al punto 1 – *introduzione ed obiettivi dello studio (misure di prevenzione a priorità 2 e 3)*, la scelta, l'adozione ed il dimensionamento di uno schema di ventilazione (premente, aspirante, biflusso a doppio condotto) rispetto ad un altro dipendono dai risultati di una Valutazione dei Rischi – tenute ovviamente in conto le condizioni locali- in base alla quale definire preliminarmente le tecniche e tecnologie da adottare per la realizzazione dell'opera, nonché, come dianzi detto, le portate di aria pulita da assicurare ai vari luoghi di lavoro, e il livello di disponibilità del sistema.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Da quanto precede si possono trarre le considerazioni seguenti:

- i sistemi di ventilazione costituiscono una risposta essenziale (seppur non la prima in ordine gerarchico nell'ambito delle misure di Prevenzione) per la gestione delle condizioni igienico-ambientali nei luoghi di lavoro sotterranei, e delle emissioni verso l'esterno;
- il quadro normativo nazionale relativo alle attività di scavo in sotterraneo al momento fornisce esaustive indicazioni di principio, ma non è aggiornato nello specifico (il DPR 320/56²² è ovviamente datato);
- la progettazione va necessariamente fondata su accurate Valutazioni di Rischio – secondo l'approccio in PtD e la gestione in corso d'opera- che peraltro nel caso delle attività di scavo in sotterraneo si presentano spesso non agevoli a causa della impossibilità di disporre di informazioni di dettaglio sulle caratteristiche locali delle formazioni da attraversare, specie in presenza di contenuti in minerali ad alta nocività distribuiti per ragioni geologiche secondo modelli non rappresentabili in termini geo-statistici;
- la progettazione deve rendere l'impianto di ventilazione nel suo insieme (motori, attuatori, condotte e sistemi di monitoraggio, regolazione ed allarme) in grado di far fronte anche a situazioni di emergenza, e contenere soluzioni finalizzate a garantire il grado di disponibilità desiderato.

CONCLUSIONI

A titolo di conclusione si può affermare che, ove si seguano le indicazioni derivanti da una corretta Valutazione dei rischi, gli impianti di ventilazione possono costituire una valida base di sicurezza per i lavoratori impegnati nelle attività di scavo, e strumento di corretta gestione delle emissioni dal sotterraneo stesso, purché sottoposti a monitoraggio in continuo della loro efficienza sulla base di parametri fondamentali discussi al punto 2 – materiali e metodi. Si noti al riguardo che, stante *“la riconosciuta difficoltà nel valutare con adeguata rappresentatività le portate nella galleria, il controllo dei parametri di ventilazione deve essere effettuato con misurazioni di portata nei soli condotti”*²³, ciò costituisce un ulteriore ovvio supporto alla scelta dello schema biflusso a doppio condotto, in quanto sia l'afflusso di aria pulita, sia il riflusso possono qui essere compiutamente verificati.

Ulteriori apporti ad un miglioramento di efficacia del sistema di gestione dell'ambiente sotterraneo potranno essere fondati su:

1. un affinamento nei criteri di selezione delle tecniche, tecnologie ed organizzazione per la conduzione dei lavori in sotterraneo, viepiù coerenti con un approccio in Prevention through Design fondato su una rigorosa Valutazione e Gestione dei rischi;
2. la generalizzazione dell'impiego di metodiche di valutazione, quali Hazard and Operability Analysis e Fault Tree / Event Tree Analysis, della effettiva disponibilità degli impianti di ventilazione, la cui impostazione e gestione sono talora ancora fondate su approcci non particolarmente aggiornati;
3. verifiche delle effettive condizioni di inquinamento dei luoghi di lavoro in sotterraneo basate su rigoroso approccio di rappresentatività statistica dei campioni: anche al riguardo, forse a causa della obsolescenza della normativa specifica, talora i criteri di impostazione degli accertamenti non garantiscono risultati costanti ed esaustivi;
4. conduzione di test sul campo per verificare la efficacia di tecniche di rilevamento degli inquinanti tipicamente prevedibili nelle attività di scavo in sotterraneo, tenute in conto le difficoltà derivanti dalle condizioni microclimatiche e logistiche sovente impegnative;
5. conduzione di rilevamenti, sempre sul campo, per la valutazione della effettiva efficacia di sistemi di confinamento e parzializzazione di volumi, e di filtrazione a ricircolo, da cui dedurre la possibilità di impiego anche in presenza di inquinanti ad elevata tossicità;
6. valutazioni, ad oggi poco diffuse, sulla possibilità di incrementare gli approcci di progettazione integrata degli impianti di movimentazione d'aria di cantiere e di esercizio, a fini tanto di miglioramento delle condizioni di sicurezza nei due scenari, quanto di economia generale di sistema;

Naturalmente poi un obiettivo al momento solo idealizzabile è pervenire, come già richiamato, ad una situazione operativa di scavo che non richieda più accesso di maestranze al sotterraneo, e quindi renda anche la ventilazione necessaria solo per ragioni tecnologiche quali il raffreddamento delle apparecchiature.

BIBLIOGRAFIA

- ¹ Lussemburg. European Economic Community. Directive 89/391/EEC on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work.1989.
- ² Italia. Decreto Legislativo n 81/2008. Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul lavoro. 2008.
- ³ The National Institute for Occupational Safety and Health. Centers for Disease Control and Prevention. <https://www.cdc.gov/niosh/topics/ptd/default.html> accesso 25/02/2018.
- ⁴ Commission Electrotechnique Internationale IEC/ISO 31010 Gestion des Risques – Techniques d’Evaluation des Risques. Ed.2009-11
- ⁵ American Institute of Chemical Engineers. Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, 2008
- ⁶ Sambuelli L, Fargione P, De Cillis E, Patrucco M. Geophysics and Tunneling - the how and the why: a focus on the why”, Proceedings of the 21st European Meeting on Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience 2015, 6 - 10 September 2015, Turin, Italy, DOI: 10.3997/2214-4609.201413687.
- ⁷ Davis GH, Reynolds SJ. Structural Geology of Rocks and Regions. 2nd Ed. 1996, John Wiley, New York, ISBN-10: 0471526215, pp.776
- ⁸ Benedetto G, Patrucco M, Pellizza S. Workplace environmental conditions and innovative tunnel driving techniques: measurement and control. Proceedings of the International Congress Tunnelling and ground conditions 1994, 3 - 7 April, Cairo, Egypt, pp. 617-623, (ed Balkema), 1994, Rotterdam, ISBN 90-5410-363-9.
- ⁹ European Commission. European Construction Technology Platform. Challenging and Changing Europe’s Built Environment A vision for a sustainable and competitive construction sector by 2030. 2005.
- ¹⁰ Panov G. 1967. Dust formation kinetics as a function of the principal mechanical properties of coals. Fiziko Teknichoskie Probl. Razeabotki Polezn. Ishopaemykh 5: 81-86.
- ¹¹ Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Standard UNI EN 529 Dispositivi di protezione delle vie respiratorie - Raccomandazioni per la selezione, l’uso, la cura e la manutenzione - Documento guida.2006.
- ¹² Italia. Decreto Legislativo n 156/2006. Norme in materia ambientale. 2006.
- ¹³ Borchiellini R, De Cillis E, Fargione P, Maida L, Nebbia R, Patrucco M. The possible contribution of a well-tested Occupational Risk Assessment and Management technique to counter the recent unexpected rise in the work related accidents. Accepted as oral presentation for the International Symposium on Occupational Safety and Hygiene, Guimarães, Portugal 26-27 March 2018.
- ¹⁴ Cvjetić AS, Lilić NM, Čokorilo VB, Milisavljević VM, Case Study on Ventilation Method Development for Bar-Boljare Highway Tunnels Construction in Montenegro. Tehnika 2017: 72(5):667-674.
- ¹⁵ Bisio P, Fargione P, Maida L. The measuring processes and equipment setup in System Quality and Occupational Safety & Health Risk Assessment. GEAM 2016:148(2): 23-32. ISSN 1121-9041
- ¹⁶ Bisio P, Fargione P, Maida L. Representativeness of the measurements results: a key issue for Occupational Risk Assessment and Management. Discussion on air dispersed particulates. GEAM 2017: 150(1):37-45, ISSN 1121-9041
- ¹⁷ Padovese P, Berti A, Pavan I, Pavan S, Fiori S, Belotti F, Nava P, Sorlini A, Patrucco M, Labagnara D, Maida L, Agnese C. Workers’ exposure to airborne particulate and crystalline silica (quartz) during the excavation of a geognostic tunnel with a full - face machine. IJOEH 2017: 8(1):13-19, eISSN: 2464-8817
- ¹⁸ Borchiellini R, Carvel R, Colella F, Rein G, Torero JL, Verda V. Calculation and design of tunnel ventilation System using a two scale modelling approach. Building and environment 2009: 44(12):2357-2367.
- ¹⁹ De Cillis E, Patrucco M, Borchiellini R, Fargione P. Risk Assessment and Management: easier said, perhaps with too many words, than done - the importance of the culture of prevention”, proceedings of the International Symposium on Occupational Safety and Hygiene, Guimarães, Portugal 2016. ISBN: 978-989-98203-6-4.
- ²⁰ Labagnara D, Patrucco M, Sorlini A. Occupational Safety and Health in Tunnelling in Rocks Formations Potentially Containing Asbestos: Good Practices for Risk Assessment and Management, American Journal of Applied Sciences 2016:13(5): 646-656. DOI: 10.3844/ajassp.2016.646.656, ISSN: 1546-9239

²¹ Bersano D, Labagnara D, Patrucco M, Pellegrino V. Affidabilità: la “Cenerentola” nella progettazione degli impianti di ventilazione in galleria” GEAM 2011: 133(2): 17-26 ISSN 1121-9041

²² Italia. Decreto del Presidente della Repubblica n 320/56. Norme per la prevenzione degli infortuni e l'igiene del lavoro in sotterraneo. 1956

²³ Linee guida sistema di ventilazione premente in galleria controllo dei parametri di ventilazione emanate dalla Conferenza Stato – Regioni pubblicata nel settembre. 2015