

La ventilazione in fase di scavo e la verifica mediante analisi CFD

NICOLÒ FAGGIONI⁽¹⁾, FRANCESCO DEVIA⁽²⁾, GIANLUCA COMEGLIO⁽¹⁾

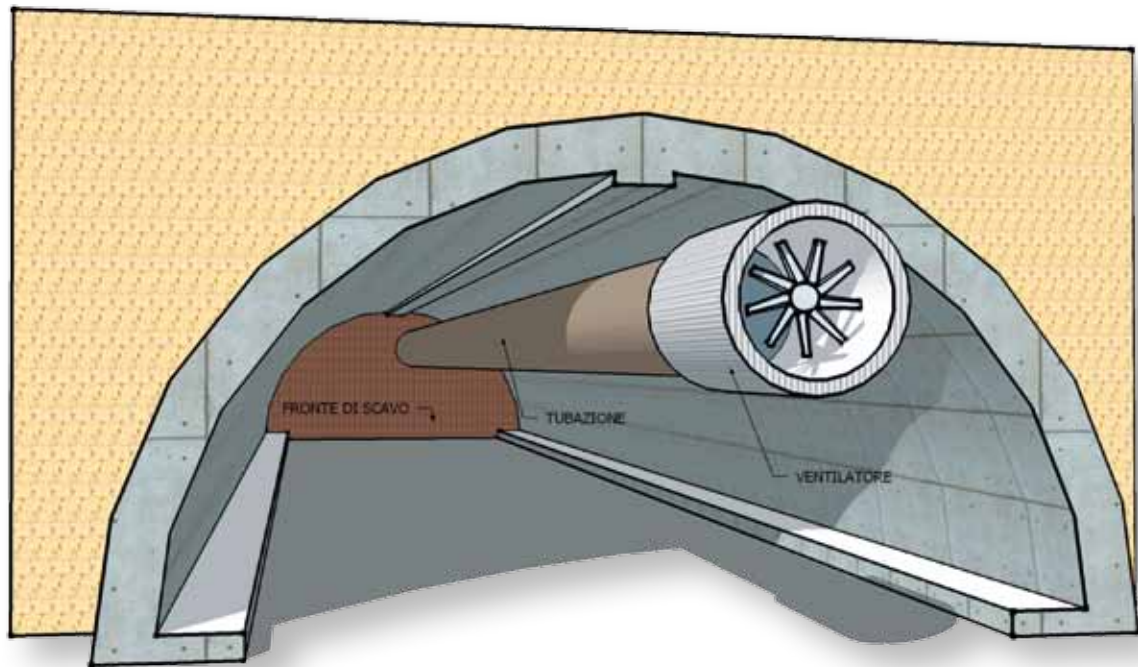


Figura 1 – Configurazione di un sistema di ventilazione di tipo premente

La ventilazione premente, realizzata con gruppi di ventilazione posti all'esterno della galleria e con tubazioni flosce all'interno, è comunemente usata per garantire un ambiente adatto alle condizioni di lavoro negli scavi in galleria. Sebbene questa attività sia normata dal DPR 320/56, lo studio del campo di moto e della diffusione delle polveri e degli inquinanti può fornire interessanti indicazioni per una efficace progettazione di dettaglio di tali impianti.

La posizione della tubazione di adduzione dell'aria di rinnovo influisce sulla corretta diluizione degli inquinanti. La posizione di installazione della tubazione in corrispon-

denza della zona di scavo ha effetto, in particolar modo, sulla qualità dell'aria nella zona di lavoro al fronte di scavo e nella zona, cosiddetta di reflusso, direttamente adiacente al terminale di mandata aria. Inoltre la portata di ventilazione determina la concentrazione di inquinanti lungo tutto il flusso di ventilazione di ritorno dal fronte influenzando lo svolgimento in sicurezza delle lavorazioni.

Per valutare il campo di moto indotto dalla ventilazione premente e verificarne al contempo l'efficacia è possibile fare ricorso alla fluidodinamica computazionale ed all'utilizzo di software dedicati per il CFD (Computational Fluid Dynamics); grazie

⁽¹⁾IMGECO S.R.L.

⁽²⁾UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA - DIME

all'utilizzo della tecnica CFD si può sviluppare l'analisi di una serie di differenti configurazioni di impianto per le quali si può effettuare la simulazione delle condizioni di esercizio e fornire la conseguente rappresentazione parametrica dei risultati.

In questo articolo è presentato il caso di studio di un sistema di ventilazione di sussidio alle lavorazioni di scavo di una nuova opera sotterranea. In particolare ci si riferisce ad un sistema di ventilazione premente di tipo tradizionale con tubazione floscia in mandata sul fronte di scavo ed impianto di ventilazione esterno, all'imbocco dello scavo (Fig. 1).

Il sistema è applicabile a qualunque configurazione in cui si preveda la presenza di un fronte di scavo, sia esso l'unico o uno dei diversi previsti per la costruzione dell'opera.

I risultati ottenuti per mezzo dell'analisi computazionale sono stati messi in relazione con quanto prescritto, in tema, dalle normative e linee guida di riferimento per la ventilazione nelle lavorazioni sotterranee.

Generalità sui sistemi di ventilazione in fase di scavo¹

L'art. 30 del DPR 320/56² "Respirabilità dell'aria ambiente negli scavi" stabilisce che: "L'aria ambiente degli scavi sotterranei deve essere mantenuta respirabile e, quanto più possibile, esente da inquinanti mediante sistemi o impianti di ventilazione atti ad eliminare o a diluire entro limiti di tollerabilità i gas, le polveri e i vapori pericolosi o nocivi". E' compito dell'impianto di ventilazione garantire un apporto di aria fresca nei cantieri di lavoro in sotterraneo in modo da raggiungere diversi scopi:

- mantenere il tasso di ossigeno quanto più possibile prossimo al 21%;
- diluire gli inquinanti aerodispersi (gas, vapori, polveri) mantenendone la concentrazione ad un livello igienicamente accettabile;
- agire sul microclima ossia sul complesso

di parametri ambientali (temperatura ed umidità) che condizionano gli scambi termici soggetto-ambiente. Occorre, infatti, tenere presente che oltre all'aumento della temperatura della roccia per gradiente geotermico, vi è un apporto termico non indifferente dai motori delle macchine operatrici durante il loro funzionamento.

Nel caso in cui si impieghino sistemi di ventilazione di tipo "premente" la ventilazione è garantita dal getto d'aria che, uscendo dalla tubazione, si allarga e rallenta miscelandosi all'aria presente in galleria. Nella zona del fronte delle lavorazioni si crea una zona di turbolenza in cui il flusso di ventilazione è deviato ed invertito per la presenza del fronte di scavo stesso. La zona delle turbolenze si estende fino ad una certa distanza dalla tubazione premente oltre la quale la velocità residua del flusso di ventilazione di ritorno scende a valori modesti. L'efficacia della ventilazione dipende, in modo decisivo, dalla forma e dall'estensione della zona di miscelazione che garantisce la diluizione degli inquinanti nel flusso di ventilazione e la successiva espulsione all'esterno del condotto.

I principali parametri che permettono di caratterizzare la ventilazione premente sono riferiti sia al flusso in mandata (velocità dell'aria all'inizio ed all'uscita del tubo di ventilazione, portata, pressione) che al sistema di riflusso (velocità di riflusso in galleria e concentrazione degli inquinanti).

Dimensionamento del sistema premente

La portata che il ventilatore di mandata fornisce costantemente al fronte di scavo o alla zona delle lavorazioni nelle normali condizioni di lavoro deve garantire soprattutto la diluizione dei gas di scarico dei mezzi impiegati per le lavorazioni ed una sufficiente ossigenazione al personale operante in sottosuolo.

È oramai pratica usuale in Europa, nel dimensionamento dei sistemi di ventilazione in sotterraneo, utilizzare i parametri di cal-

colo della normativa Svizzera S.I.A. 196-98³. Tale norma prescrive che la portata totale d'aria di rinnovo sia calcolata come il prodotto di una portata unitaria specifica per la potenza totale effettivamente impiegata al fronte/zona di lavorazione. La portata unitaria specifica varia in funzione della natura e della tipologia dei mezzi presenti al fronte e della presenza di personale. In particolare si prescrive una portata d'aria fresca unitaria di:

- 4 m³/min/kW di potenza impiegata durante le fasi di scavo (o in presenza di macchine da scavo);
- 2 m³/min/kW di potenza impiegata durante le fasi di carico e trasporto del materiale o di getto.

I valori della portata unitaria salgono rispettivamente a 6 e 3 m³/min/kW in caso di impiego di macchine/attrezzature non dotati di sistema di controllo dei gas di scarico (catalizzatori, filtri antiparticolato, ecc.). La quantità d'aria di ventilazione viene calcolata nella fase più critica delle lavorazioni, tenendo in considerazione che le lavorazioni possono prevedere una contemporaneità di esercizio o susseguirsi secondo uno schema di lavorazione predefinito; nel caso parte delle lavorazioni siano contemporanee, deve essere introdotto un adeguato coefficiente di contemporaneità.

In presenza di personale di lavoro al fronte, le portate sono maggiorate di una portata unitaria pari a 3 m³/min/persona al fine di garantire una sufficiente condizione di sicurezza e di comfort del lavoro in sottosuolo.

Per garantire un trasporto efficace degli inquinanti, di ritorno dal fronte di scavo verso l'uscita all'aperto, è necessario verificare che nelle normali situazioni di lavoro la velocità di ritorno dell'aria dal fronte nelle condizioni di progetto calcolate non sia inferiore a 0.3 m/s.

Portata ventilatore

I valori di portata calcolati come sopra si riferiscono alla portata di rinnovo richiesta al fronte di scavo; al fine di compensare le eventuali perdite distribuite (per sfiati o lacerazioni) lungo la tubazione floscia, all'inizio del condotto dovrà essere

immessa una portata superiore a quella calcolata. Per questo la portata d'aria dei ventilatori posti all'imbocco viene sovradimensionata, in funzione della natura e dello stato delle tubazioni (suggerite sempre dalla SIA 196), secondo una metodologia di calcolo prestabilita.

Lungo la tubazione di trasporto aria al fronte si determinano delle perdite di portata dovute alla natura del materiale della tubazione stessa ed alle giunzioni in linea (Fig. 2). La perdita di portata si calcola con la formula:

$$Q_p = C_{eff} \cdot f \cdot A \cdot P^{0.5}$$

dove Q_p è la portata, che trafila all'esterno del condotto di mandata, per unità di lunghezza della tubazione [m^3/s], C_{eff} è un coefficiente di efflusso diagrammato sulla norma, f è un fattore di perdita [mm^2/m^2 di tubazione] e P è la pressione in quel tratto unitario di condotto [Pa].

Ricordando che la pressione interna alla tubazione dipende dalle perdite di carico che, a loro volta, sono determinate dalla portata d'aria di ogni singolo tratto, poiché la pressione interna della tubazione varia lungo il percorso, varia anche la perdita unitaria di portata per metro lineare di tubazione; la portata d'aria di rinnovo da immettere all'ingresso della tubazione è quindi funzione della portata stessa e pertanto si deve ricorrere alla formulazione della risoluzione per via iterativa, suddividendo la condotta in tratti di breve lunghezza in cui si possano considerare trascurabili le variazioni di pressione.

Una volta determinati tutti i contributi unitari di Q_p , si determina la Q_1 con la formula $Q_1 = Q_0 + \sum Q_p$.

Calcolo pressioni progetto

Una volta determinati la portata minima richiesta al fronte di scavo e la portata totale richiesta al ventilatore è necessario conoscere le caratteristiche di pressione richieste al ventilatore per vincere le resistenze del circuito aeraulico. È necessario conoscere, oltre alle caratteristiche della galleria anche il diametro, la tipologia e lo stato manutentivo delle tubazioni di ventilazione prescelte. La formula utilizzata per il calcolo delle perdite di carico lungo la tubazione è la seguente:

$$dp = 0.5 \cdot \rho \cdot u^2 \cdot (\lambda \cdot dx/D)$$

dove dp è la perdita di carico statico [Pa] per unità di lunghezza dx [m] della tubazione, λ è il coefficiente di perdita di carico globale dovuto alla rugosità della superficie interna della tubazione e alla presenza di giunzioni presenti nel tubo, D è il diametro nominale della tubazione [m], u è la velocità media [m/s] del flusso d'aria nel tronco dx e ρ è la massa volumica dell'aria [kg/m^3].

Alle perdite di carico distribuite lungo la tubazione si sommano le perdite di carico concentrate imputabili alla presenza, lungo il condotto, di discontinuità fisiche e geometriche tali da alterare il moto dell'aria all'interno della tubazione stessa. Sono causate, più precisamente, dalla presenza di variazioni di forma e geometria del condotto/tubazione, pezzi speciali, giunzioni e raccordi, diffusori, silenziatori, setti, serrande ed altri componenti speciali. Per ogni perdita localizzata è associato un dato coefficiente ζ ; complessivamente, quindi, le perdite concentrate si possono definire mediante la:

$$dp_c = \sum \zeta \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot u^2$$

La somma di tutte le perdite unitarie e delle perdite concentrate lungo la tubazione fornisce la pressione statica totale utile richiesta al ventilatore ad inizio linea. Alla pressione totale utile si aggiunge ancora la pressione residua p_0 richiesta a fine condotto per consentire, all'aria, il ritorno verso l'uscita della galleria. L'aria in uscita dalla tubazione terminale, infatti, deve possedere una pressione residua necessaria a consentire il ritorno a valle e l'uscita dalla galleria. La pressione residua è calcolabile mediante la:

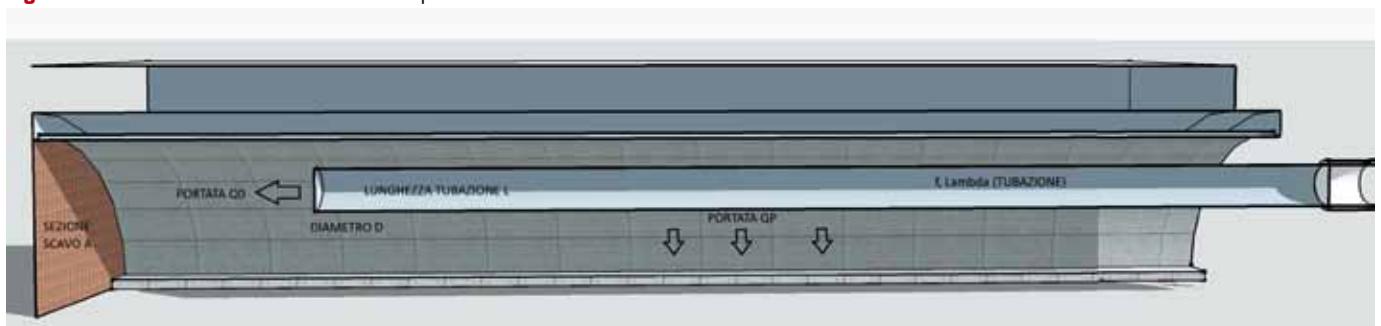
$$dp_r = 0.5 \cdot \rho \cdot u_g^2 \cdot (\lambda \cdot L/D_h)$$

dove λ è il coefficiente di perdita di carico globale dovuto alla rugosità equivalente delle pareti della galleria, L la sua lunghezza [m], D_h il suo diametro idraulico [m] e u_g la velocità del flusso in galleria [m/s].

λ (Lambda) e coefficiente di perdita delle tubazioni

Il coefficiente di attrito, λ , caratteristico di una tubazione, è determinato sia dalla natura del materiale e dalla finitura superficiale propria del tubo sia della sua posa e della relativa cura di utilizzo. Il valore può variare con il diametro e può essere determinato mediante l'utilizzo di informazioni tecniche dettagliate (fornite dal costruttore), mediante l'esperienza o il tipo di applicazione cui è destinato. La norma S.I.A. definisce l'esistenza di tre classi di tubazioni e per ciascuna classe specifica il valore caratteristico di λ e del coefficiente di perdita specifico (Tab. 1 –

Figura 2 – Portata di rinnovo al fronte e portata del ventilatore



Classi di tubazioni prementi (S.I.A. 196/93) Tab. 1).

Il coefficiente di perdita è dovuto al fatto che l'impianto non è a tenuta e pertanto sull'intera lunghezza della tubazione, durante l'esercizio, si ha una perdita di trafilamento. Le perdite di trafilamento vanno compensate immettendo nella tubazione una portata d'aria maggiore al fine di garantire al fronte di scavo la portata teorica richiesta. La norma definisce le tre classi S, A e B.

In base al tipo di installazione ed utilizzo previsto è compito del progettista determinare quale classe associare alla tubazione, ai fini del calcolo delle perdite di portate e delle cadute di pressione.

Tabella 1 – Classi di tubazioni prementi (S.I.A. 196/93)

Classi tubazioni S.I.A. 196/93		
Classe tubazione	λ	Coeff. Perdita mm^2/m^2
S (super)	0.015	5
A	0.018	10
B	0.024	20

Installazione della tubazione premente

L'efficacia della ventilazione di tipo premente oltre che dipendere dal corretto dimensionamento dell'impianto è funzione della corretta posizione della tubazione premente rispetto al fronte di scavo. Un flusso d'aria in uscita da una tubazione circolare, di diametro "D", inserito

in un condotto a geometria definita avente sezione molto più grande e diametro caratteristico "Dh", impiega una certa distanza "L" per distribuirsi su tutta la sezione libera del condotto. La distribuzione del flusso d'aria sulla sezione, infatti, è necessario per garantire l'uniformità di diluizione degli inquinanti ed il corretto ritorno dei flussi dal fronte delle lavorazioni. Il corretto posizionamento della tubazione terminale rispetto al fronte di scavo è quindi di fondamentale importanza per la corretta ventilazione dello stesso e la diluizione degli inquinanti lungo tutta la galleria. Generalmente, l'angolo di apertura di un getto d'aria in uscita dalla tubazione è pari a 10° e pertanto la lunghezza "L" sopra definita è pari a 5 volte "Dh". Quanto sopra è generalmente verificato, secondo la S.I.A., per velocità dell'aria in uscita dalla tubazione compresa tra 10 e 15 metri/secondo.

Verifiche CFD

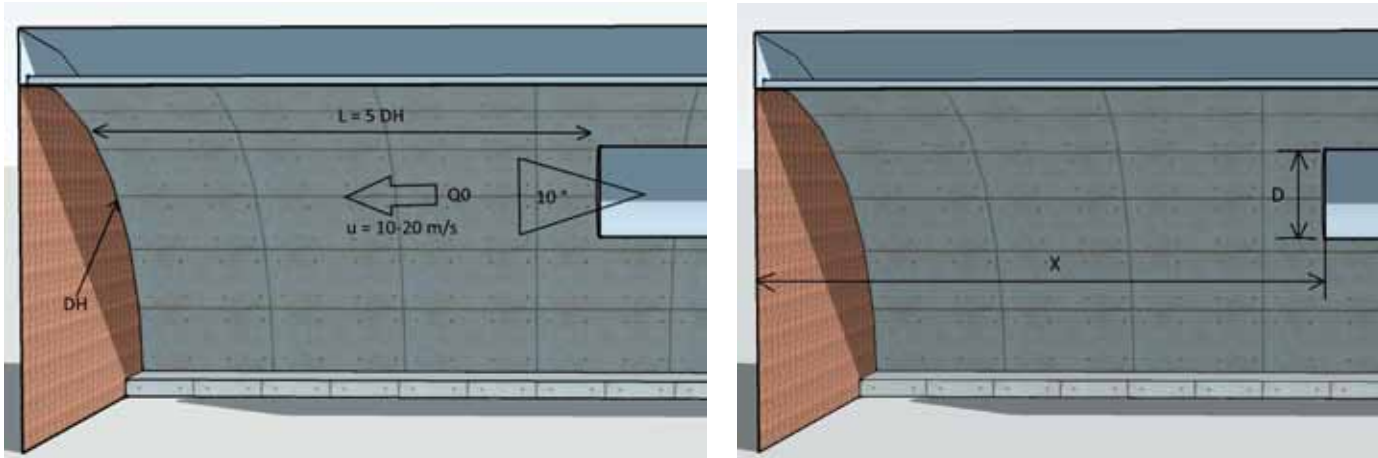
Lo svolgimento di uno studio basato sulla tecnica CFD permette di effettuare valutazioni dettagliate del campo di moto di un fluido. Questa tecnica si applica molto bene al caso del campo di moto indotto dalla ventilazione premente nella zona di scavo. In questo studio si è voluto analizzare gli effetti che la posizione del terminale di ventilazione rispetto al fronte di scavo generano sull'efficacia delle ventilazione. Lo scopo è quello di verificare come una corretta installazione della tu-

bazione premente, soprattutto nel suo tratto terminale, assicuri, a parità di portata di rinnovo, una migliore diluizione degli inquinanti sia in prossimità del fronte delle lavorazioni che lungo tutto il ritorno in galleria. Nel proseguo si farà quindi riferimento ad un caso standard di ventilazione in sotterraneo con sezione di scavo pari a circa 130 m^2 (13 m diametro) e presenza di mezzi al fronte per un totale di 1.000 kW. Si ipotizza il funzionamento di un sistema premente con aspirazione in aria libera (esterno galleria) e mandata mediante tubazione floscia da 1600 mm di diametro. In primis si verificherà l'efficacia della ventilazione con il variare della distanza del terminale di mandata aria dal fronte di scavo. Determinata la distanza ideale dal fronte si andrà a modificare il diametro della tubazione premente e si provvederà a ripetere la procedura di ottimizzazione della posizione terminale. Le variazioni di diametro sulla tubazione comporteranno, a parità di portata prefissata, la variazione della velocità di sbocco del flusso di ventilazione. L'analisi del campo di moto prodotto e dei risultati sulla diluizione degli inquinanti consentirà la formulazione di un'ipotesi di installazione ottimale.

Dominio di calcolo

Ai fini delle simulazioni CFD si considera la ventilazione in una galleria con fronte di scavo in avanzamento alla progressiva 200 m. La lunghezza modesta consente, a parità di risorse computazionali disponibili, l'utilizzo di una griglia di calcolo CFD

Figure 3 e 4 – Posizione terminale di mandata aria



più accurata determinando una maggiore affidabilità dei risultati di calcolo. Con il metodo di calcolo delle portate di rinnovo precedentemente descritto (S.I.A. 196/93) si verifica la portata di ventilazione richiesta al fronte di scavo per le lavorazioni e si applica tale portata al terminale di mandata verificando, a valle del calcolo, l'andamento delle concentrazioni inquinanti prodotte in galleria. Si parametrizzano la distanza di installazione del terminale X dal fondo scavo ed il diametro della tubazione di mandata D. Come anticipato, la variazione del diametro della tubazione, a parità di portata di mandata, comporta la variazione di velocità del flusso di ventilazione in galleria e ciò si riflette sulla determinazione della corretta distanza di installazione X del terminale dalla zona delle lavorazioni (Fig. 3 e 4).

Emissioni inquinanti al fronte

Per poter progettare l'impianto di ventilazione è necessario definire la portata di emissione degli inquinanti di riferimento per l'ambiente di lavoro considerato; in particolare si determinano le produzioni di polveri (PM10) e Monossido di carbonio (CO) sulla base della produzione di inquinanti di riferimento per la lavorazione in essere. Per ogni inquinante viene calcolato un fattore orario di emissione in funzione delle attività di lavorazione effettivamente svolte all'interno della galleria e della relativa durata. Le lavorazioni che producono emissioni di polveri sono principalmente quelle legate all'attività di scavo ma devono essere considerati, ai fini della ventilazione, anche tutti i contributi provocati dalle attività di contorno quali il caricamento dei mezzi d'opera nonché il trasporto all'esterno della galleria. Si fa pertanto riferimento, ai fini della determinazione delle portate inquinanti, alle seguenti operazioni:

- scavo e demolizione;
- carico sui mezzi;
- trasporto ed allontanamento.

Ai fini della definizione dei fattori base di emissione si è fatto riferimento alle pubblicazioni EPA ed ai relativi standard di emissione riportati negli SCC⁴. In particolare per la fase di scavo si è fatto rife-

Tabella 2

Emissione di polveri nelle lavorazioni in galleria					
SCAVO	Avanzamento scavo m/giorno	Sezione di scavo m ²	Q.tà materiale scavato m ³	Fattore di emissione kg/m ³	Polveri emesse kg
	2	130	260	0.003	0.78
CARICO	Q.tà materiale scavato m ³	Densità app. materiale ton/m ³	Q.tà materiale scavato ton	Fattore di emissione kg/ton	Polveri emesse kg
	260	1.8	468	0.0012	0.56
TRASPORTO	Lunghezza trasp. km	Carico medio viaggio ton	Numero viaggi	Fattore di emissione kg/km	Polveri emesse kg
	0.15	25	19	1.26	3.59
Totale polveri emesse giornaliere - kg					4.93

rimento all'SCC 3-05-010-36 Mineral Products Industry: Coal Mining, Cleaning, and Material Handling, nel quale il fattore di emissione in kg delle polveri per m³ di materiale scavato è calcolato con la formula:

$$E = \frac{9.3 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{H}{0.3}\right)^{0.7}}{M^{0.3}}$$

dove H è l'altezza in m di caduta del materiale/ammasso ed M il suo contenuto percentuale di umidità. Si calcola dalla formula un fattore medio pari a 0.003 kg/m³. Per la fase di carico si è fatto riferimento al SCC 3-05-025-06 Bulk Loading Construction Sand and Gravel, nel quale è indicato un fattore di emissione medio pari a 1,2 x 10⁻³ kg per tonnellate di materiale caricato. Per la fase di trasporto si considera l'allontanamento del materiale su pista non asfaltata per i soli primi 150 m di galleria (dal fronte).

La letteratura ed i testi di riferimento⁵ indicano per piste con contenuto di silt pari al 14% e camion con carico medio di 25 t un fattore di emissione di polveri (PTS) pari a 1.26 kg/km. Dalle considerazioni sopra riportate è possibile calcolare la portata totale di emissione dal fronte di scavo e dalle attività correlate come riportato nel prospetto che segue. Alle polveri prodotte dalle lavorazioni in galleria vanno sommati gli inquinanti

prodotti dall'utilizzo delle macchine operatrici e dai loro motori a combustione interna. In particolare si avrà una produzione di polveri e di CO proporzionale alla potenza effettivamente presente in galleria, che abbiamo ipotizzato pari a 1.000 kW. Il fattore di proporzionalità è legato ai due fattori base di emissione assunti pari (Standard EURO IV – Euro V) rispettivamente a 1.5 g/kWh per il CO (Tab. 4) e 0.02 g/kWh per il particolato (Tab. 3). Introducendo un fattore di contemporaneità delle lavorazioni pari a 0.5 si determinano le portate di emissione totale giornaliere di inquinante dovuto all'utilizzo dei mezzi operativi. Ai fini di semplificare l'analisi del problema fluidodinamico si ipotizza che tutte le portate inquinanti calcolate siano concentrate al fronte delle lavorazioni; ai fini delle simulazioni fluidodinamiche si definiscono, quindi, le seguenti emissioni inquinanti:

- emissione di polveri di 5.17 kg/giorno (0.06 g/s);
- emissione di CO di 18 kg/giorno (0.21 g/s).

Tabella 3

Emissione di CO per l'utilizzo di mezzi operativi			
Potenza mezzi kW	Fattore contemp.	Fattore di emissione CO kg/kWh	CO emesso kg
1000	0.5	0.0015	18

Tabella 4

Emissione di polveri per l'utilizzo di mezzi operativi			
Potenza mezzi kW	Fattore contemp.	Fattore di emissione CO kg/kWh	Polveri emesse kg
1000	0.5	0.00002	0.24



Figura 5 – Posizione terminale di mandata aria

Rappresentazione del modello di riferimento

Ai fini della modellazione CFD viene elaborato un modello geometrico di riferimento della galleria in cui sono inseriti il fronte di scavo caratterizzato dalla portata di emissione inquinante (Fig. 5), le pareti di contorno del dominio, il portale da cui avviene l'accesso alla galleria e l'impianto di ventilazione premente costituito dal sistema ventilatore-tubazione. All'interno del dominio è definita un'unica zona fluida (aria) in cui si andranno a verificare l'effettiva distribuzione degli inquinanti nel flusso d'aria di ventilazione valutando così l'efficacia del sistema di ventilazione. All'interno del solutore CFD vengono definite le seguenti condizioni al contorno:

- adiabaticità e scabrezza di tutte le pareti;
- portata massica al fronte (inquinante);
- portata aria di rinnovo (ventilatore);
- scabrezza della tubazione floscia;
- regime di ventilazione naturale all'esterno della galleria.

Vengono al contempo parametrizzate la distanza di installazione X ed il diametro D come descritto (Fig. 6).

Curva caratteristica del ventilatore

In accordo con quanto sopra descritto, la superficie di mandata del ventilatore è stata modellata attraverso la definizione di un "fan", che permette l'inserimento della curva caratteristica specifica del ventilatore, e tramite la definizione della relativa curva pressione/velocità. Le differenti verifiche sono state eseguite assu-

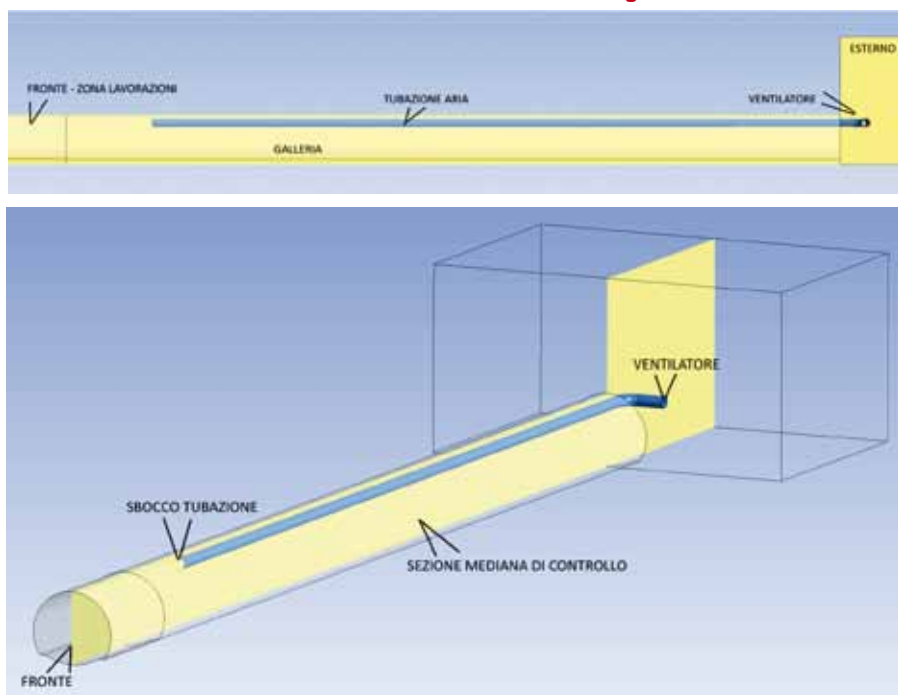


Figura 6 – Dominio di calcolo

mendo costante la portata di mandata del ventilatore (curva pressione portata verticale) in modo da verificare esclusivamente l'efficacia della ventilazione dovuta al posizionamento della tubazione terminale.

Materiali e impostazioni del solutore

Per il calcolo delle soluzioni fluidodinamiche sono state utilizzate le seguenti impostazioni del solutore (Tab. 5). Si ricorda che ai fini del calcolo si sono ipotizzate costanti le proprietà termofisiche dell'aria relative a densità, calore specifico e viscosità.

Risultati

I risultati delle simulazioni sono espressi in forma di scala cromatica delle concentrazioni inquinanti sulla sezione mediana longitudinale di galleria. Lungo la medesima sezione di controllo sono tracciate, inoltre, anche le curve isovalore di velocità scalate. La rappresentazione grafica

Impostazioni del Solutore	
Caratteristica solutore	Proprietà
Modello/ Tempo	3D / Stazionario
Viscosità	Turbolento-Standard k-epsilon
Funzioni di parete	Standard
Discretizz. pressione	Standard
Discretizz. momento	Primo ordine
Discretizz. turbolenza	Primo ordine

Tabella 5 – Impostazioni del Solutore CFD

dei risultati consente un agevole confronto tra le differenti simulazioni consentendo l'analisi di sensibilità dei parametri prestabiliti. Un diverso punto di vista sulla distribuzione degli inquinanti è dato dall'osservazione delle linee di flusso che permettono di seguire il moto dell'aria in galleria. Le linee di flusso evidenziano il comportamento del flusso di ventilazione lungo tutta la galleria; osservando il campo di moto descritto dalle linee di flusso si possono notare i punti nei quali la grande vorticosità del flusso di ventilazione in prossimità del fronte di scavo nei casi di errato posizionamento del terminale di ventilazione è associata alla scarsa diluizione degli inquinanti e alla ridotta qualità dell'aria.

Efficacia della ventilazione al variare della distanza fronte-terminale X

Nelle figure che seguono sono rappresentati i risultati delle simulazioni di calcolo al variare del parametro X. Si è considerato la variazione del parametro X compresa tra 1.5 e 8 diametri idraulici della sezione di scavo (equivalenti a lunghezze com-

prese tra 20 e 110 m). L'influenza del parametro X è analizzata in funzione delle velocità di mandata dalla tubazione di ventilazione, la quale è funzione, a portata costante, del diametro della tubazione stessa. I risultati sono espressi come di seguito rappresentato sulla sezione mediana di galleria, per ciascuno scenario, secondo l'ordine di raffigurazione presta-

Figura 7 – Schema di raffigurazione dei risultati

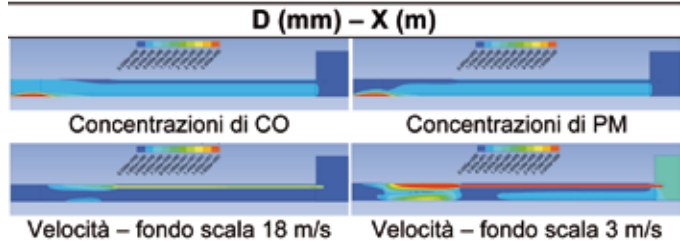


Figura 8 – Rappresentazione completa dei risultati - scenario D = 1.600 mm

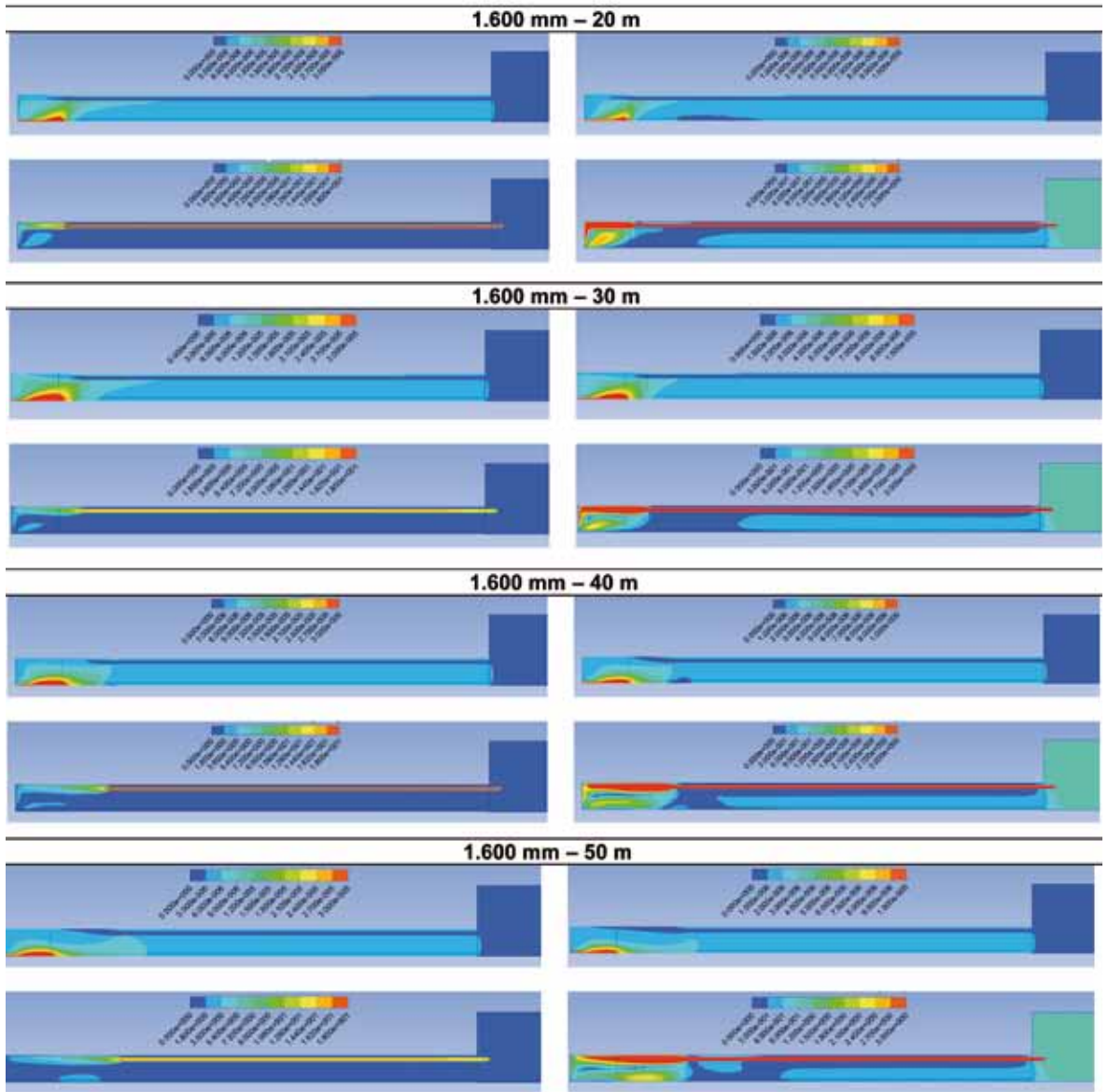
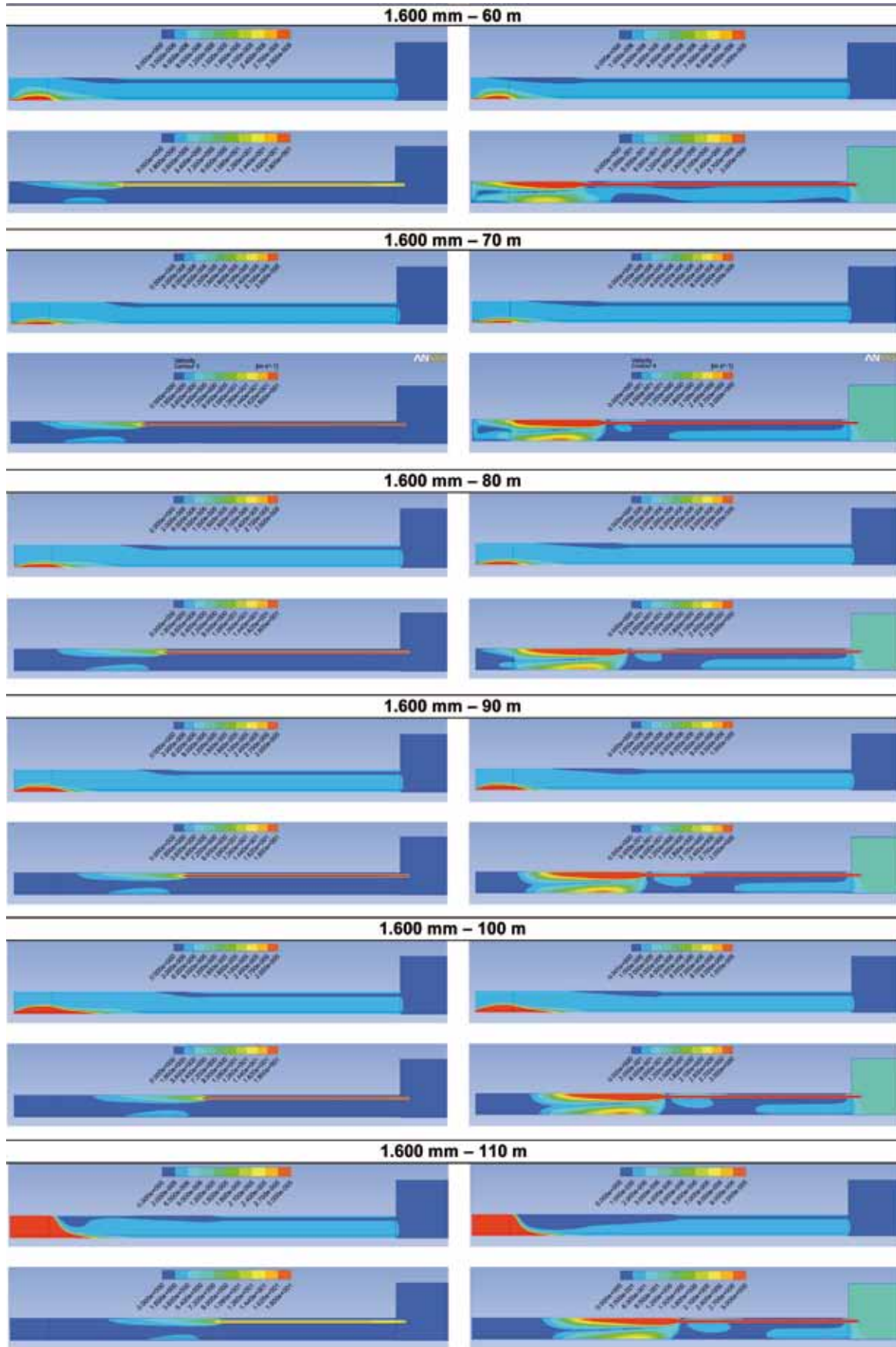
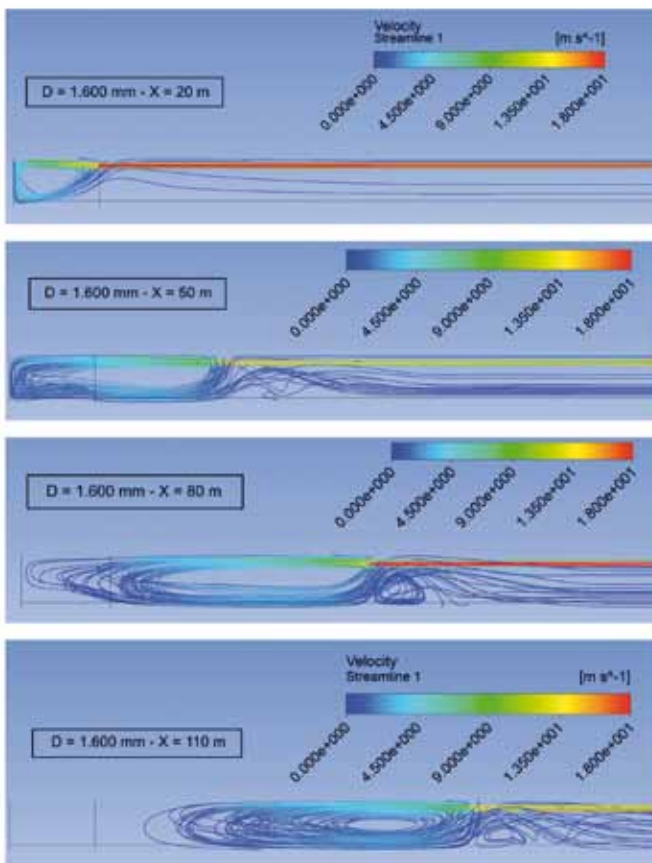


Figura 8



bilito (Fig. 7). A titolo di esempio si riportano a seguire i risultati completi del campo di moto e delle concentrazioni inquinanti ottenuti nello scenario con tubazione di diametro 1600 mm (Fig. 8). Dalla rappresentazione grafica dei risultati è possibile verificare come a valori del parametro X molto bassi siano associati forti turbolenze nella zona subito a ridosso del terminale di ventilazione mentre per valori molto alti, si riscontri una ventilazione insufficiente della zona del fronte di scavo. Ciò è messo in evidenza anche dall'analisi degli andamenti delle linee di flusso come evidenziato nelle immagini che seguono. In particolare nelle figure che seguono (Fig. 9) è riportato il confronto tra le linee di flusso prodotte nei due scenari caratterizzati dalla presenza della tubazione premente da 1600 mm di diametro alla distanza dal fronte di 20, 50, 80 e 110 m. Le linee di flusso sono rappresentate in scala di colori in funzione dei valori di velocità associati.

Figura 9 – Confronto andamento linee di flusso scenario D = 1.600 mm

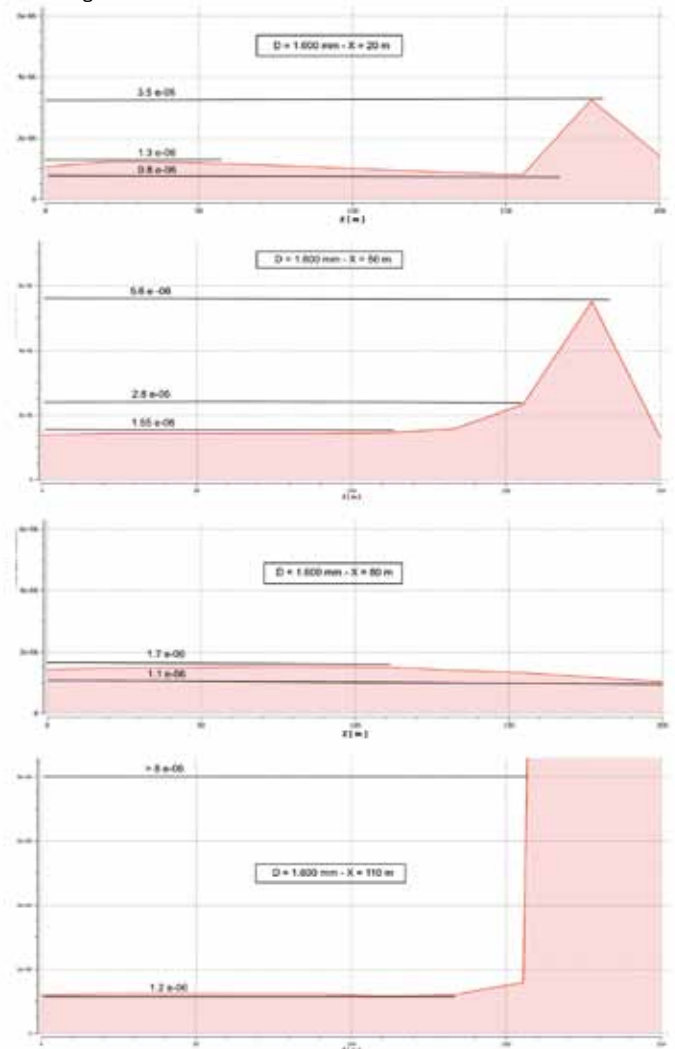


Si riporta a seguire (Fig. 10) anche l'andamento in forma grafica delle concentrazioni inquinanti di PM lungo la sezione mediana di galleria associati ai quattro scenari sopra analizzati.

I grafici mostrano come al variare della distanza di installazione X del terminale di ventilazione dal fronte di scavo varino sia le concentrazioni di picco nella zona delle lavorazioni sia le concentrazioni medie nel flusso di ventilazione di ritorno. La posizione del terminale influenza il campo delle concentrazioni per quasi tutta la lunghezza della galleria; nell'ultimo tratto di galleria, quando la miscelazione degli inquinanti nel flusso di ventilazione è completa, le concentrazioni convergono al medesimo valore di fondo che è funzione della sola portata di progetto calcolata. Come evidenziato dagli andamenti delle linee di

flusso riportate nei prospetti, distanze di installazione superiori a quelle ottimali, rendono vano il rinnovo d'aria nella zona delle lavorazioni con la creazione di un così detto effetto tappo; distanze inferiori creano problemi alla ventilazione specialmente nella zona di riflusso della ventilazione laddove il flusso di ritorno attraversa l'aria di galleria in cui è installata la tubazione terminale. La corretta posizione del terminale di ventilazione consente una corretta ed efficace diluizione degli inquinanti sia nelle immediate vicinanze del fronte di scavo che nella zona più delicata delimitata dall'area di reflusso della ventilazione ubicata nelle immediate vicinanze del terminale di emissione. Come facilmente ipotizzabile, le concentrazioni a regime nel flusso di ventilazione di ritorno in galleria, per effetto della co-

Figura 10 – Confronto andamento concentrazioni inquinanti lungo la sezione mediana scenario D = 1.600 mm



stanza di portata, convergono per tutti gli scenari ai medesimi valori di riferimento. L'analisi è completata anche per gli scenari caratterizzati da inferiori velocità di mandata del flusso di ventilazione per effetto dell'aumento di sezione utile della tubazione premente (diametri 1.800 e 2.000 mm).

Conclusioni

Dall'analisi completa dei risultati si determinano i corretti valori del parametro X che portano all'ottimizzazione dell'installazione del sistema premente. I valori ottimali del parametro X, come evidenziato nelle immagini che seguono (Fig. 11), va-

riano con la dimensione della tubazione premente e quindi con la velocità del flusso di ventilazione. I valori caratteristici per gli scenari analizzati sono compresi tra 5 e 8 diametri idraulici (Dh) della galleria. Bassi valori del parametro X sono adatti per velocità dei flussi di ventilazione più contenute (10-12 m/s) mentre distanze superiori sono ottimali per velocità più elevate (18-20 m/s). Fuori dai range ottimali di installazione, gli andamenti delle concentrazioni inquinanti aumentano in tutta l'area compresa tra il terminale di mandata della tubazione premente ed il fronte delle lavorazioni. Generalmente velocità inferiori a 10 m/s o superiori a 20 m/s non sono applicabili

perché portano a sovradimensionamenti delle tubazioni prementi (velocità basse) o a dimensionamenti troppo spinti degli apparati di ventilazione (velocità elevate). ■

Note

¹ Note Interregionali per la sicurezza nello scavo di gallerie – Standard di sicurezza per la realizzazione delle Grandi Opere Infrastrutturali – Regioni Emilia-Romagna e Toscana.

² D.P.R. 20/03/1956, n. 320, Norme per la prevenzione degli infortuni e l'igiene del lavoro in sotterraneo.

³ Swiss SIA standard 196, underground ventilation (edition 1998).

⁴ Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors.

⁵ AP 42 Section 13.2.2 Unpaved Roads - Related Information.

Figura 11 – Andamento delle concentrazioni di PM al variare di X scenario D = 1.600 – 1.800 e 2.000 mm

