LA PREVENZIONE INCENDI NELLE OPERE IN SOTTERRANEO - APPLICAZIONI DI MODELLAZIONE SOFTWARE -

E. Fileppo, *L. Marmo*, *I. Manfroi*^{*}, *M. L. Debernardi*, *K. Demetri*, *R. Pertusio* Dipartimento di Scienza dei Materiali e Ingegneria Chimica, Politecnico di Torino C.so Duca degli Abruzzi 24, 10100 Torino ^{*}IMIFABI S.p.A, viale dei Mille 68, 10129 Milano

- ABSTRACT -

La corretta individuazione e messa in opera delle misure di gestione delle emergenze incendi rappresenta, per le opere che richiedono una estesa cantierizzazione in sotterraneo, uno dei problemi prioritari nell'ambito della sicurezza. Lo scopo del presente lavoro è quello di presentare i risultati emersi dall'analisi di modellazioni relative alla distribuzione dei flussi termici e dei prodotti di combustione all'interno di una miniera in sotterraneo, relativi ad alcuni scenari di incendio rappresentativi di condizioni tipiche. Nei cantieri in sotterraneo, infatti, gli incendi possono essere considerati, al pari dei cedimenti strutturali, come la fonte di rischio a maggiore magnitudo.

Lo studio è stato condotto in collaborazione con una della maggiori imprese minerarie italiane: l'IMIFABI S.p.A., il cui personale ha contribuito, grazie alle specifiche competenze di settore, a modellizzare correttamente gli aspetti tecnici della cantierizzazione mineraria.

Complessivamente lo studio ha consentito di delineare con precisione le caratteristiche fisiche e termodinamiche di un possibile scenario di incendio in sotterraneo permettendo l'individuazione delle principali criticità e la conseguente scelta delle corrette modalità di intervento.

1. INTRODUZIONE

Gli incendi possono ragionevolmente essere considerati la fonte di rischio a maggiore "magnitudo" in sotterraneo, al pari dei cedimenti strutturali. Come è possibile desumere dai dati USBM (vedi Figura. 1), essi traggono spesso origine dalle complesse attrezzature installate e, solo in minima parte, da fenomeni legati alla presenza di gas naturali o polvere infiammabile (es. carbone).



Figura 1: Principali cause d'incendio in sotterraneo, dati riferiti al decennio 1989-1998, tratto da [5]

Da questi dati emerge chiara la necessità di rivolgere attenzione e cura prioritarie nei confronti dei veicoli e delle apparecchiature elettriche. Inoltre, molti tra gli incendi evidenziati nelle precedenti categorie sono riferibili a veicoli da trasporto, perforazione e, più in generale, ai mezzi diesel operanti in sotterraneo, per i quali è possibile individuare vere e proprie "famiglie" di sorgenti d'incendio di seguito descritte:

- 1. <u>impianti di scappamento</u>: la mancanza di acqua nelle vaschette di gorgogliamento del circuito di scappamento provoca surriscaldamenti locali che possono innescare accumuli di polveri o incrostazioni;
- 2. <u>motori e accessori</u>: cinghie o circuito di raffreddamento difettosi possono innescare le incrostazioni e le polveri depositate;
- 3. <u>movimento con freni di servizio serrati (freni a secco)</u>: può provocare il riscaldamento e l'innesco dei depositi di polvere;
- 4. <u>serraggio inopportuno del freno a mano</u>: (come al punto 3);
- 5. <u>flessibile del compressore</u>: per macchine dotate di circuito di aria compressa (avviamento e frenatura) si possono rilevare principi d'incendio sul circuito del compressore;
- 6. <u>ponti di trasmissione tipo Scout</u>: rottura del ponte con conseguente riscaldamento per attrito;
- 7. <u>corpi grassi</u>: accumuli di grassi e depositi d'olio nel comparto motore possono facilmente trovare innesco nelle alte temperature raggiunte da alcuni componenti presenti nel comparto stesso ;
- 8. <u>varie</u>: in particolare il decantatore di gasolio.

Gli incendi in ambiente sotterraneo sono caratterizzati, oltre che dai pericoli tipicamente legati alla loro stessa natura, anche dal fatto che tali fenomeni si sviluppano in ambienti confinati o semi-confinati con tutte le problematiche aggiuntive che tale restrizione comporta.

In queste condizioni, infatti, l'incendio assume una dimensione spesso quasi "catastrofica" in ragione della lentezza dell'evacuazione, della presenza di vie di uscita poco numerose spesso raggiungibili in tempi eccessivi e, non ultimo, della dispersione all'interno delle gallerie dei prodotti di combustione con conseguenze sulla visibilità e sulla tossicità dell'aria.

In questo contesto, già di per sé critico, si aggiungono spesso ulteriori fattori di rischio: la difficoltà di avvicinare i mezzi di estinzione in prossimità dell'incendio, fattori sterici (l'impossibilità di adottare getti "a parabola" limiterebbe, per esempio, la gittata di eventuali idranti a circa 10 metri), la rapida dispersione dei prodotti di combustione nella rete di gallerie dovuta alla ventilazione forzata, eventuali inversioni nei percorsi previsti per l'aria dovuti all'espansione termica dei gas combusti.

A fronte di numerosi studi pubblicati ([4], [6], [7], [8]), è comunque ragionevole affermare che la principale problematica negli incendi in sotterraneo non è dovuta tanto al calore, spesso tollerabile ad alcune decine di metri dalla sorgente, quanto ai gas e fumi di combustione. Essi infatti, oltre a contenere notevoli quantità di CO e a limitare notevolmente la visibilità, possono contenere anche sostanze estremamente tossiche (es. HCl) che risultano dannose anche a bassa concentrazione.

I fumi sono composti da centinaia di migliaia di particelle singolarmente invisibili all'occhio umano, ma visibili complessivamente per fenomeni di attenuazione o riflessione della luce (a seconda che la sorgente luminosa sia collocata rispettivamente dietro o davanti alle particelle) che sono anche responsabili della riduzione della visibilità quantificata per mezzo della densità ottica D.

Comunemente il fenomeno di attenuazione luminosa viene infatti utilizzato per caratterizzare i fumi: data una sorgente T di intensità nota che attraversa una nuvola di fumo di lunghezza L è possibile definire il parametro D = densità ottica [m-1] come:

$$D = \frac{1}{L} \log \left(\frac{I_0}{I} \right) \tag{1}$$

L'importanza di tale parametro nel contesto degli incendi in sotterraneo è sottolineata dal NIOSH [4] studi hanno provato che:

- per una persona che non conosce le vie di fuga, la capacità di fuga risulta compromessa per valori D>0,066 m⁻¹;
- per un individuo con buona conoscenza delle vie di fuga tale capacità viene compromessa per valori di D>0,22 m⁻¹.

A titolo d'esempio, nella tabella 1 sono riportate le concentrazioni di CO nei fumi di combustione di vari materiali; si noti che le soglie di pericolo per questo gas si aggirano attorno a svariate centinaia di ppm (6÷800 ppm provocano lo svenimento dei soggetti dopo alcuni minuti d'esposizione), mentre l'IDLH è pari a

1200 ppm. I dati in Tabella 1 si riferiscono a densità ottiche di 0,22 e 0,92, cui corrisponde mediamente una visibilità rispettivamente di 4 m e 1 m.

Tabella 1a: Valori di concentrazione di monossido di carbonio, in funzione del combustibile e della visibilità dei fumi per incendi con combustione a brace, tratto da [4].

Combustibile	CO [ppm] per D=0,22 m ⁻¹	CO [ppm] per D=0,92 m ⁻¹
Legno	36,0	150,0
Carbone	9,0	38,0
Nastro trasportatore in SBR	2,5	10,5
Nastro trasportatore in PVC	3,0	12,5
Nastro trasportatore in neoprene	7,0	29,0

Tabella 1b: Valori di concentrazione di monossido di carbonio, in funzione del combustibile e della visibilità dei fumi per incendi con combustione a fiamma, tratto da [4].

J_1		
Combustibile	CO [ppm] per D=0,22 m ⁻¹	CO [ppm] per D=0,92 m ⁻¹
Legno	56	234
Carbone	17	71
Nastro trasportatore in SBR	19	79
Nastro trasportatore in PVC	42	176
Nastro trasportatore in neoprene	32	143
Olio da trasformatore	7,5	31

Dalla Tabella 1 si desume che, negli incendi in sotterraneo, anche in condizioni di visibilità molto limitata, i livelli di CO sono notevolmente ridotti rispetto alla soglie di pericolo immediato: la principale problematica risulta quindi l'effetto di "accecamento", che può pregiudicare la capacità degli operatori di mettersi in salvo e prestare soccorso.

Non deve tuttavia essere trascurata la possibile presenza di altre sostanze tossico-nocive nei fumi e gas di combustione. Tra le varie sostanze è comune trovare rilevanti quantità di HCl, soprattutto ove sono usati nastri trasportatori.

Si definisce un indice di tossicità complessivo, indicativo di una situazione ad immediato rischio di intossicazione in base all'equazione 2:

$$TOX = \frac{ppmCO}{1500} + \frac{ppmHCl}{100} \ge 1$$

(2)

Anche in questo caso (si veda la Tabella 2), in presenza di condizioni di visibilità proibitive per l'evacuazione, l'indice di tossicità è ancora notevolmente al di sotto della soglia di allarme.

Tabella 2a: Valori di tossicità dei fumi in funzione del materiale e della visibilità negli incendi con combustione a brace, tratto da [4].

Combustibile	TOX a D=0,22 m ⁻¹	TOX a D=0,92 m ⁻¹
Legno	0,024	0,100
Carbone	0,006	0,025
Nastro trasportatore in SBR	0,009	0,038
Nastro trasportatore in PVC	0,014	0,059
Nastro trasportatore in neoprene	0,075	0,313

Tabella 2b: Valori di tossicità dei fumi in funzione del materiale e della visibilità negli incendi con combustione a fiamma, tratto da [4].

Combustibile	TOX a D=0,22 m ⁻¹	TOX a D=0,92 m ⁻¹
Legno	0,037	0,155
Carbone	0,011	0,046
Nastro trasportatore in SBR	0,033	0,138
Nastro trasportatore in PVC	0,114	0,476
Nastro trasportatore in neoprene	0,005	0,021

Pertanto nel corso del lavoro si sono sviluppate delle simulazioni di un plausibile scenario d'incendio, con particolare riferimento alla diminuzione di visibilità provocata dai fumi, mediante l'utilizzo di due codici di calcolo, MFIRE sviluppato dall'United States Bureau of Mines (USBM) e FDS2 (Fire Dynamic Simulator release 2) sviluppato dal National Institute for Standards and Technology (NIST).

Minefire è un programma di simulazione che consente di calcolare la ventilazione di reti di gallerie e la risposta dinamica della stessa a seguito di perturbazioni delle grandezze termiche e meccaniche del sistema. Minefire simula un sistema di ventilazione e la sua risposta all'alterazione dei parametri di ventilazione, in particolare la temperatura o la presenza di un incendio.

FDS2 è un codice CFD espressamente sviluppato per la simulazione d'incendi in ambiente confinato, basato sulla tecnica LES "Large Eddy Simulation". Si è deciso di limitare la simulazione con FDS a un tratto di carreggio interessato dalla presenza di un dumper in quanto il codice comporta un impegno computazionale estremamente elevato.

Entrambi i codici necessitano, tra i dati di input, della velocità di combustione, per la cui definizione occorre fare riferimento al paragrafo successivo.

2. SCENARIO

La rete di gallerie studiata nel corso del presente lavoro è rappresentata in figura 3 e le dimensioni caratteristiche sono riassunte nella tabella 3.



Figura 3: Schematizzazione bidimensionale della miniera in sotterraneo oggetto delle simulazioni d' incendio con indicazione dei nodi e dei flussi di ventilazione stimati con VENTMASTER per lo scenario d'incendio simulato.

Una rampa elicoidale conduce dal piano campagna a due carreggi disposti su due livelli successivi posti rispettivamente a 180 e 200 m dal p.c. L'avanzamento lavori interessa il carreggio al livello 2 (carreggio 2), mentre quello superiore (carreggio 1) è sostanzialmente inutilizzato e pertanto è interessato da un flusso di ventilazione estremamente ridotto. La ventilazione è garantita da un attuatore Woods 160 JM posto in aspirazione al termine del fornello di riflusso cui sono asserviti entrambi i carreggi.

Nel corso delle simulazioni è stata utilizzata una configurazione del sistema di ventilazione cui corrisponde, nel carreggio (2), una velocità dell'aria pari a 2 m/s. Circa a metà del suo sviluppo si trova un veicolo da trasporto (dumper) causa dell'incendio.

La dinamica del fenomeno è tratta da [1], l'incendio ha origine a seguito di una modesta perdita dal circuito idraulico, che opera alla pressione di circa 270 bar, nel quale è contenuto come fluido di servizio un olio minerale.

L'incendio si articola in quattro fasi che rappresentano il progressivo maggiore coinvolgimento del dumper.

Fase 1: perdita d'olio da un foro nel circuito idraulico, si suppone innesco pressoché immediato;

Fase 2: alcuni cavi elettrici e tubi di gomma del circuito idraulico iniziano a bruciare;

Fase 3: cedimento dei tubi di gomma e conseguente incremento della fuoriuscita di idrocarburo;

Fase 4: caduta della pressione dell'olio nel circuito idraulico, con diminuzione dell'entità delle perdite, ma contemporaneo coinvolgimento delle gomme del mezzo.

Airway	Name	Node I	Node J	Flow IJ (m^3/s)	Pressure (Pa)	Fan (I->J)	Friction (Ns^2/m^8)	Lenght (m)	Area (m^2)
2	rampa	2	3	33,8	-3,1		0,00275	58	16
3	rampa	3	4	33,8	-3,1		0,00275	58	16
4	rampa	4	5	33,8	-3,1		0,00275	58	16
5	rampa	5	6	33,8	-3,1		0,00275	58	16
6	rampa	6	7	33,8	-3,1		0,00275	58	16
7	rampa	7	8	33,8	-3,1		0,00275	58	16
8	rampa	8	9	33,8	-3,1		0,00275	58	16
9	rampa	9	10	33,8	-3,1		0,00275	58	16
10	rampa	10	11	33,8	-3,1		0,00275	58	16
11	rampa	11	12	32,0	-2,8		0,00275	58	16
12	livello 2	12	18	32,0	-5		0,00488	100	16
13	livello 1	11	14	1,8	-35,6	-	0,02709	422	16
14	fornello	13	14	32,0	-12,5		0,01217	20	3,14
15	formello	14	15	33,8	-13,9		0,01217	20	3,14
16	fornello	15	17	33,8	-407,2		0,35645	160	3,14
17	Vent. princ.	17	16	33,8	-27,8	6	0,02434	20	3,14
18	A	18	19	32,0	-0,2		0,00024	5	16
19	В	19	20	32,0	-0,2		0,00024	5	16
20	С	20	21	32,0	-0,5		0,00047	10	16
21	D	21	22	32,0	-0,5	-	0,00047	10	16
22	E	22	23	32,0	-0,5		0,00047	10	16
23	livello 3	23	13	32,0	-12,6		0,01231	260	16

Tabella 3: dimensioni caratteristiche della miniera oggetto delle simulazioni di incendio.

Le caratteristiche dell'olio e i dati quantitativi di ciascuna fase, come desunti da [1], sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4:	Fasi di	sviluppo	dell'ince	endio.
------------	---------	----------	-----------	--------

Fase	Inizio [min]	Componenti coinvolti	Rateo di combustione [kg/min]	Sviluppo termico [kJ/min]	Sviluppo termico complessivo [kJ/min]
Fase 1	0	Olio da perdita circuiteria idraulica	1,81	84.404,5	84.404,5
Easo 2	1	Olio da perdita circuiteria idraulica	1,81	84.404,5	120 200 5
rase 2	1	Caveria elettrica	0,45	16.353,4	150.299,5
		Circuiteria idraulica	0,91	29.541,6	
		Olio da perdita circuiteria idraulica	1,81	84.404,5	
Fase 3 3	2	Caveria elettrica	0,45	16.353,4	1 206 266 7
	5	Circuiteria idraulica	0,91	29.541,6	1.390.300,7
		Olio da cedimento della circuiteria idraulica	27,21	1.266.067,2	
		Caveria elettrica	0,45	16.353,4	
		Circuiteria idraulica	0,91	29.541,6	
Fase 4	11	Olio da cedimento della circuiteria idraulica	0,91	42.202,2	207.107,5
		Gomme	3,63	119.010,3	

3. MODELLAZIONE

Innanzitutto è stato ipotizzato e modellato su supporto CAD il sistema di carreggi, camere, fornelli di ventilazione e silos sotterranei di stoccaggio che hanno costituito la struttura dell'unità estrattiva oggetto dello studio. In un secondo tempo il tracciato CAD, opportunamente semplificato per le esigenze delle fasi

successive, è stato integrato con le caratteristiche fisiche e geometriche (vedi Tabella 3), le quali, congiuntamente ai parametri microclimatici ed alle curve caratteristiche dell'attuatore principale, hanno permesso di determinare i flussi di ventilazione in ogni ramo della rete studiata. Tale modellazione è stata eseguita con l'ausilio del software VENTMASTER, sviluppato presso il Politecnico di Torino [2], ed ha permesso di individuare un plausibile regime di ventilazione della rete cui corrisponde una velocità dell'aria nel carreggio al livello 2 pari a 2 m/s.

Nella Figura 3 sono riportati i valori di portata d'aria in ogni ramo della rete di ventilazione in termini di m^3/s

La dinamica dell'incendio è stata simulata mediante l'utilizzo di due strumenti software, MFIRE, sviluppato dall'USBM e FDS2 sviluppato dal NIST. Nel corso delle simulazioni i dati ricavati con VENTMASTER sono stati utilizzati come condizioni al contorno del problema.

A seguito della modellizzazione dei flussi di ventilazione nell'unità estrattiva in condizio ni operative di regime, è stata costruita una matrice di input all'interno della quale sono stati riportati in formato alfanumerico il layout dell'unità estrattiva, le caratteristiche tecniche, il microclima, la disposizione e la curva caratteristica dell'attuatore principale, l'ubicazione del focolaio e la sua evoluzione nel tempo secondo le modalitàrichieste da MFIRE.

A tale fine la rete di gallerie, carreggi e fornelli costituenti la miniera oggetto delle simulazioni è stata scomposta in tratti con caratteristiche fisiche e geometriche uniformi (rami) applicando le stesse modalità di suddivisione adottate durante l'analisi dei flussi di ventilazione in VENTMASTER.

In particolare, poiché il software utilizzato consente la stima puntuale dei parametri termodinamici soltanto nei "nodi" della rete, il tratto di carreggio del 2° livello interessato dal fenomeno di combustione è stato suddiviso in una serie di rami di lunghezza variabile tra i 5 e i 10 m al fine di valutare con maggiore precisione, in termini spaziali, l'evoluzione del fenomeno stesso. Le fasi evolutive dell'incendio (Tabella 4) sono state in seguito riportate tra i dati di input del processo di calcolo in termini di flussi termici complessivi, congiuntamente alle condizioni al contorno dell'evento simulato (portate di ventilazione, temperatura media all'interno della rete, temperatura esterna, temperatura della roccia, conducibilità e diffusività termica della roccia...).

Il veicolo da trasporto oggetto dell'incendio è stato collocato nel carreggio al secondo livello, a 105 m dalla sezione di imbocco del carreggio stesso (Nodo 12, Figura 3).

Al termine del processo di calcolo, si è pervenuti ad una prima serie di risultati costituiti essenzialmente dalle temperature e dalle percentuali dei fumi di combustione presenti nei "nodi" e nei rami del circuito di ventilazione stimati in step temporali successivi di 15 secondi.

In fase di analisi dei risultati è stato dato maggior peso ai parametri stimati nei nodi della rete poiché i valori riferiti ai singoli rami rappresentano la media relativa all'intera lunghezza dei rami stessi.

Infine, sia allo scopo di validare i risultati ottenuti, sia al fine di approfondire le peculiarità dell'evoluzione dell'incendio in prossimità del focolaio, è stata eseguita un'ulteriore modellizzazione dell'evento mediante l'applicazione del codice FDS2 ad una sezione parziale del carreggio al secondo livello che contiene il dumper. Questa simulazione non è stata estesa all'intera miniera a causa dell'elevato numero di celle di calcolo necessario per la corretta discretizzazione di tutta la struttura. I risultati hanno comunque consentito di valutare gli effetti di diffusione termica e la stratificazione dei prodotti di combustione in prossimità del focolaio.

Il dominio dell'analisi termo-fluidodinamica è stato individuato in un tratto di carreggio comprensivo dell'area oggetto del processo di combustione, di lunghezza pari a 107,6 m per una sezione di 16 n². In ragione della linearità dei profili di sezione relativi ai carreggi conseguenti alle moderne tecniche di scavo, in fase di modellizzazione è stato ritenuto utile approssimare il reale profilo del carreggio con una sezione quadrata di 4 metri di lato.

Il dumper è stato posizionato a 62 metri dall'inizio del dominio di simulazione



Figura 4: Rappresentazione del dominio di simulazione utilizzato per il codice FDS2.

La collocazione asimmetrica del veicolo rispetto al baricentro del dominio di simulazione trova ragione nell'impossibilità del codice di calcolo di valutare l'espansione dei prodotti di combustione dovuti all'effetto throttling al di fuori della sezione di ingresso del flusso di ventilazione. Tale flusso è stato determinato imponendo nel codice una portata di aspirazione nella sezione di uscita del dominio tale da eguagliare la portata ottenuta per la sezione considerata con il software VENTMASTER nelle fasi precedenti (32 m^3 /s cui corrisponde una velocità di 2 m/s).

In ragione del notevole impegno computazionale il dominio di calcolo è stato inoltre dimezzato mediante la funzione di mirroring disponibile nel codice di calcolo, impostando un piano di simmetria verticale disposto longitudinalmente rispetto alla sezione del carreggio.

La successiva discretizzazione del dominio ha portato alla creazione di una griglia tridimensionale suddivisa in 576 celle lungo l'asse principale del carreggio (asse x), 32 celle in altezza (asse z) e 20 celle in larghezza (asse y) per un totale di 368640 celle discretizzate.

Al fine di migliorare ulteriormente l'analisi del fenomeno in prossimità dell'epicentro dell'incendio la discretizzazione del dominio lungo gli assi x e z è stata sottoposta ad un processo di stretching lineare il quale ha comportato l'infittimento della griglia nell'area dell'incendio. Tale operazione di stretching può essere rappresentata (vedi Figura 5) su un piano cartesiano avente in ascissa la dimensione uniforme iniziale delle celle ed in ordinata la dimensione finale delle stesse. L'entità e la collocazione dello stretching è determinata dalle coordinate nel piano cartesiano di Figura 5 dei due punti di deformazione che sono definiti allo scopo dall'utente.



Le principali caratteristiche geometriche del dominio di simulazione e del dumper sono state in seguito rappresentate mediante il generatore e visualizzatore di griglia SMOKEVIEW, mentre i dati relativi alle caratteristiche fisico-chimiche dei materiali oggetto del processo di idraulico, combustione (olio caveria...) sono stati integrati nel database delle sostanze combustibili del codice di calcolo. In Figura 6 viene riportata la schematizzazione del dumper implementata nel generatore di griglia di FDS2. La geometria della macchina è stata riprodotta con l'utilizzo di 20 "blocchi" omogenei attraverso i quali è stato possibile i diversi caratterizzare materiali componenti il veicolo.

Le fasi evolutive dell'incendio, congiuntamente alle condizioni al contorno dell'evento simulato, sono state riportate, analogamente alle simulazioni eseguite con MFIRE, in termini di flussi termici complessivi tra i dati di input del processo di calcolo, al fine di rendere il più possibile confrontabili gli output ottenuti da entrambi i codici di calcolo.

I parametri monitorati lungo il piano di mirroring nell'analisi CFD sono stati individuati in: temperatura, visibilità, densità, velocità (in direzione e modulo) dei fumi.

Figura 6: Rappresentazione del dumper mediante il generatore di griglia SMOKEVIEW.

4. RISULTATI

Vengono in seguito presentati i dati di output ottenuti dai processi di calcolo eseguiti con i due modelli software. Tali dati, al fine di facilitarne la lettura e l'analisi, sono riportati in veste grafica sotto forma di andamenti in funzione del tempo. I valori raffigurati si riferiscono ad alcuni nodi significativi del dominio di calcolo. Tutti i nodi si trovano nel carreggio inferiore, eccezion fatta per il N° 16, che si trova all'uscita del

fornello di riflusso principale. Nella Tabella 5 sono riportate le coordinate dei nodi, ad esclusione del N° 16, riferite alla posizione del dumper. Un valore negativo indica che il nodo si trova a monte del mezzo, rispetto al flusso di ventilazione.

Tabella 5: coordinate dei nodi riferite alla posizione del dumper.

Nodo	13	18	20	21	23
Coordinata assiale [m]	290	-10	0	10	30

SIMULAZIONI EFFETTUATE MEDIANTE MFIRE

Le simulazioni sono state eseguite in un intervallo di 800 s a partire all'istante di innesco ed hanno richiesto circa 5 secondi di tempo di calcolo su una piattaforma monoprocessore AMD ATHLON 1.2 GHz dotata di 384 MB di memoria RAM.

Nella Figura 7 si propongono gli andamenti della temperatura nei nodi più significativi in funzione del tempo. Si può osservare un modesto aumento della temperatura dei nodi più prossimi all'area di collocazione del veicolo (20, 21, 23), che si manifesta quasi contemporaneamente all'innesco (t=0), e che porta i nodi alla temperatura di circa 50 °C. Dopo circa 180 s, in corrispondenza del passaggio dell'incendio alla fase 3, si manifesta un brusco innalzamento della temperatura, che raggiunge valori superiori ai 400 °C. Tali valori sono mantenuti per oltre 600 secondi, cioè fino al termine della fase 3.



Figura 7: Dati di output di MFIRE Andamento della temperatura nei nodi della rete in funzione del tempo.

Nella successiva Figura 8 è riportato l'andamento della percentuale di fumi nei nodi, che appare complessivamente concorde con quello della temperatura presentato in Figura 7.

Si osserva in particolare che il nodo 18, collocato a monte del dumper, non è interessato da incrementi della temperatura né tantomeno raggiunto dai fumi. Questo accade perché MFIRE non ha previsto in nessuna misura l'effetto throttling nelle condizioni simulate.

SIMULAZIONI EFFETTUATE MEDIANTE FDS2

Le simulazioni eseguite con FDS2 hanno coperto 800 secondi reali e hanno richiesto un tempo di calcolo di poco superiore a 100 ore su una piattaforma monoprocessore AMD ATHLON 1.2 GHz dotato di 384 MB di memoria RAM. Tutti i nodi di rilevamento sono stati collocati all'altezza di 1.80 m, in corrispondenza della mezzeria del carreggio.



Figura 8: Dati di output di MFIRE Andamento della percentuale dei fumi nei nodi della rete in funzione del tempo.

Le simulazioni hanno mostrato un significativo effetto throttling che portava i fumi al tempo 0+250 s alla sezione d'ingresso del dominio di calcolo, dove apparentemente essi erano riflessi all'interno. I risultati analizzati sono stati in conseguanza necessariamente limitati ai primi 250 secondi. L'andamento della temperatura ai nodi come calcolato da FDS2 è complessivamente simile a quello ottenuto con MFIRE come è possibile evincere dalla Figura 9.



Figura 9: Dati di output di FDS2 Andamento della temperatura nei nodi della rete (rilevati in posizione centrale rispetto alla sezione del carreggio a 1,8 m di altezza)

Nella Figura 10 è riportata in veste grafica la temperatura nel carreggio dopo 240 s dall'innesco dell'incendio. Appare evidente come anche a monte del mezzo il valore sia incrementato a causa della retroespansione dei fumi.



Figura 10: Dati di output di FDS2: Andamento della temperatura lungo la sezione longitudinale centrale del carreggio al tempo 0+240s.

Il fenomeno della retroespansione è ancora più evidente nella Figura 11, in cui è riportato l'andamento della visibilità, calcolato in accordo a [3]. In particolare il nodo 18 presenta una brusca diminuzione dopo circa 250 secondi.

La figura 12 mostra complessivamente la visibilità in prossimità del dumper, anche in questo caso l'effetto throttling appare molto evidente.



Figura 11: Dati di output di FDS2: Andamento della visibilità nei nodi della rete (rilevati in posizione centrale rispetto alla sezione del carreggio a 1,8 m di altezza).



Figura 12: Dati di output di FDS2: Andamento della visibilità (espressa in metri) lungo la sezione longitudinale centrale del carreggio al tempo 0+240s

5. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si presentano i risultati delle simulazioni di uno scenario di incendio in una miniera in sotterraneo effettuate con due differenti software: MFIRE e FDS2.

Le simulazioni hanno portato a stimare l'andamento temporale della temperatura, dei tenori di fumi e della visibilità in alcuni nodi rappresentativi della struttura analizzata. I dati output dei due software mostrano andamenti tra loro comparabili e compatibili con le caratteristiche termiche e fluidodinamiche dell'evento simulato. I valori numerici non risultano altresì direttamente comparabili a causa della diversa strutturazione dei due codici di calcolo. Come è possibile evincere dalle precedenti figure l'andamento dei valori delle grandezze misurate appare notevolmente variabile lungo le sezioni (sia longitudinali che trasversali), pertanto i valori puntuali rilevati dal codice CFD non possono essere posti in relazione diretta con i valori medi di nodo elaborati da MFIRE.

Complessivamente viene riscontrato uno scenario in cui temperature non compatibili con operazioni di evacuazione e/o soccorso sono riscontrabili dopo circa 3 minuti dall'innesco e comunque, in riferimento ai dati ottenuti dalla simulazione CFD, in un'area limitata ad alcune decine di metri dal focolaio. Il marcato effetto di stratificazione dei flussi termici, al contrario, non ha reso possibile la valutazione diretta delle condizioni di percorribilità del carreggio dai dati di output mediati per "nodo" di MFIRE. Diversamente il problema della visibilità assume contorni assai diversi a causa dell'elevata velocità di diffusione dei fumi e della modesta potenza delle sorgenti di illuminazione adottate nei sotterranei minerari. Una prima stima degli andamenti di visibilità ottenuti dal processo di calcolo porterebbe a stimare una soglia temporale pari a circa 3 minuti all'interno dei quali la visibilità si mantiene entro un range compatibile con operazioni di emergenza. Da sottolineare tuttavia il fatto che recenti studi [3] hanno dimostrato una sovrastima delle condizioni di visibilità legata alla metodologia di calcolo utilizzata in FDS superiore di circa 3 volte alle stime eseguite mediante il metodo di valutazione della densità ottica. Tali ricerche suggeriscono pertanto, al fine di una analisi cautelativa dei risultati ottenuti la riduzione degli stessi ad un terzo del valore originale. In tale contesto emergerebbe la criticità di una notevole riduzione dei tempi di intervento/evacuazione i quali scenderebbero per la quasi totalità dei nodi analizzati sotto la soglia dei 60 s. Si ricorda inoltre che gli effetti tossici e asfissianti dei fumi non sono stati soggetti a valutazione in questa fase dello studio anche in ragione del fatto che il personale operante in sotterranei minerari è dotato di autorespiratori di emergenza a ciclo chiuso sufficienti a garantire i corretti flussi respiratori per tempi compresi tra i 30 ed i 60 minuti.

Da evidenziare infine che il codice CFD ha permesso di evidenziare l'effetto throttling e la conseguente espansione dei prodotti di combustione lungo il carreggio anche nel verso opposto al flusso di ventilazione, effetto non riscontrabile nell'output del codice MFIRE.

6. SIMBOLOGIA

D	Densità ottica	m^{-1}
Ι	Intensità luce residua	W
I ₀	Intensità luce emessa	W
L	Cammino ottico	m
TOX	Indice di tossicità	-

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] USBM Mfire users manual, ver. 2.20, August 1995
- [2] E. Fileppo, I.Manfroi, M. Patrucco, D. Savoca- An enhanced pc operating software for numerical simulations of mine ventilation networks: main features, performance and field tests results. Proceedings of the 7th international mine ventilation congress-Cracovia-2001
- [3] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2nd Edition. Section 2. Chapter 15, National Fire Protection Assoc., Quincy, MA, DiNenno, P. J.; Beyler, C. L.; Custer, R. L. P.; Walton, W. D., Editor(s)(s), 2/217-227 p., 1995.
- [4] Behavioral and Organizational Dimensions of Underground Mine Fires By Charles Vaught, Ph.D., Michael J. Brnich, Jr., Launa G. Mallett, Ph.D., Henry P. Cole, Ed.D., William J. Wiehagen, Ronald S. Conti, Kathleen M. Kowalski, Ph.D., and Charles D. Litton, NIOSH 2000.
- [5] http://www.susqu.edu/honors/articles/minefirestats.pdf Susquehanna University, Selinsgrove, Pennsylvania
- [6] Subsurface Ventilation and Environmental Engineering, Malcom j. Mcpherson, Kluwer Academic Publishers 2002
- [7] Decision making during a simulate mine fire escape, AAVV, USBM, 1995
- [8] Mining Health and Safety, Vol. 2 N° 1, NIOSH, July 1997