

**SIMULAZIONE DI INCENDIO
IN REPARTO DI PRODUZIONE DI STABILIMENTO INDUSTRIALE
MEDIANTE MODELLO CFD
FDS2 Applicato allo Studio dell'Andamento dei Fumi**

A. Ferrari

*Andrea Ferrari – Industrial Loss Control & Engineering s.r.l. – Via Vincenzo Monti 52, 20017 Rho –MI–
Tel. +39 02 93904351 – Fax: +39 02 93904350 – E-Mail: ferrari@ilceng.it*

G. Coppola

*Gaetano Coppola – Industrial Loss Control & Engineering s.r.l. – Via Vincenzo Monti 52, 20017 Rho –MI–
Tel. +39 02 93904351 – Fax: +39 02 93904350 – E-Mail: coppola@ilceng.it*

L. Nigro

*Luciano Nigro – Industrial Loss Control & Engineering s.r.l. – Via Vincenzo Monti 52, 20017 Rho –MI–
Tel. +39 02 93904351 – Fax: +39 02 93904350 – E-Mail: nigro@ilceng.it*

1 SINTESI DELLO STUDIO

Lo studio consiste nell'analisi di uno scenario di incendio presso le linee di produzione di uno stabilimento industriale mediante l'applicazione di un modello CFD di simulazione di incendio. Lo scopo dello studio è quello di prevedere l'andamento dei fumi prodotti da un incendio campione, in un volume predefinito e in tempi confrontabili con quelli attesi per il pieno sviluppo di eventi di questo tipo. La zona oggetto della simulazione è uno dei reparti di produzione dello stabilimento, al fine di valutare l'agibilità del percorso di esodo più sfavorito in relazione alle condizioni di visibilità dovute all'incendio. L'attività descritta è stata condotta applicando il modello di fluidodinamica computazionale FDS (versione 2) sviluppato dal NIST.

È stata analizzata l'agibilità del percorso di esodo più sfavorito per il quale la simulazione prevede condizioni di visibilità superiori alla lunghezza del maggiore percorso di esodo.

2 QUALIFICHE PROFESSIONALI

La società Industrial Loss Control & Engineering opera ormai da circa 20 anni nel settore della prevenzione dei danni, in qualità di società di servizio per le Aziende Industriali più varie, con settori di produzione che vanno dalla chimica al vetro, dagli alimentari ai trasporti, fino alle aziende che operano a loro volta nel campo dei servizi d'ingegneria e che si avvalgono di specialisti in aree specifiche.

Da oltre due anni la ILC&E. ha avviato una partnership operativa con Hughes Associates Inc., società statunitense leader nell'ingegneria e nella ricerca applicata nel settore della prevenzione e protezione contro gli incendi.

Hughes Associates ha applicato modelli di simulazione a molteplici scenari di incendio, utilizzando FDS sin dalle fasi iniziali dello sviluppo del modello.

ILC ha condotto e sta tuttora svolgendo una serie di studi in collaborazione con i Laboratori del Gran Sasso dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, analizzando scenari di incendio come:

- incendio catastrofico in galleria autostradale ([1]: *CFD Simulations of a Truck Fire in the Underground Gran Sasso National Laboratory*);
- incendi di auto in galleria con protezione water mist;
- incendi e propagazione di fumi con coinvolgimento di cavi di segnale e potenza, di rack elettronici.

3 METODO

Il metodo utilizzato nello sviluppo dello studio di sicurezza oggetto di questa relazione è consistito nell'applicazione dei criteri di analisi prestazionale antincendio internazionalmente riconosciuti come rispondenti allo stato dell'arte ([2]: *SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection Analysis and Design of Buildings*). In particolare l'approccio è consistito nella determinazione delle fasi per mezzo delle quali condurre l'analisi di tipo prestazionale, partendo dalla definizione della portata del progetto, attraverso l'identificazione dello scopo e degli obiettivi fino allo sviluppo dello scenario di incendio e alla analisi dei risultati previsti dalla simulazione.

4 SCOPO ED OBIETTIVI

Lo scopo dello studio è quello di prevedere l'andamento dei fumi prodotti da un incendio campione, definito in base alla quantità ed alla tipologia di materiale combustibile presente nell'area di produzione considerata, in un volume predefinito e in tempi confrontabili con quelli attesi per il pieno sviluppo di eventi di questo tipo.

La zona oggetto della simulazione è un'ampia porzione del reparto di produzione dello stabilimento in cui sono situate le postazioni di lavoro caratterizzate dal percorso di esodo di maggiore lunghezza.

Lo studio dell'andamento dei fumi è stato condotto al fine di valutare l'agibilità della via di esodo più sfavorevole in relazione alle condizioni di visibilità dovute ai fumi sviluppati dall'incendio.

L'attività descritta è stata condotta applicando il modello di fluidodinamica computazionale FDS (versione 2) sviluppato dal NIST ([3],[4],[5] McGrattan et al., 2001; [6]).

4.1 Criterio prestazionale

Una volta determinato il tempo di evacuazione complessivo ed esaminata la distribuzione dei fumi all'istante di completa evacuazione, è stata valutata la concentrazione di fumi a 2 metri da terra ([10] Drysdale D., 1998, p. 394). Al fine di valutare l'adeguatezza dei percorsi di esodo, è stato individuato come criterio prestazionale la visibilità all'altezza $h=2$ m, accertando che essa sia non inferiore alla lunghezza del maggiore percorso di esodo.

5 IL MODELLO: FDS

Fire Dynamics Simulator (FDS) è un modello sviluppato dal NIST che simula l'incendio e ne predice gli effetti, cui è associato Smokeview, un post-processore grafico che può essere utilizzato per analizzare i dati prodotti da FDS.

FDS risolve una forma delle equazioni di Navier-Stokes appropriata per i flussi termici a bassa velocità di fumi e gas generati in un incendio. FDS è stato oggetto di numerosi studi di validazione sia interni al NIST sia di enti esterni.

FDS permette la modellazione dell'incendio a partire da un database di materiali standard, distribuito con il programma, consentendo al tempo stesso all'utente l'introduzione di nuovi materiali definiti in base alle relative caratteristiche chimico-fisiche ed ai dati di incendio sperimentali. La dinamica dell'incendio è poi simulata in base ai parametri che caratterizzano ciascun materiale presente nel dominio di simulazione, ciascuno con le proprie caratteristiche di infiammabilità e combustione o di reazione all'incendio. Infatti, in base a questi dati, FDS risolve numericamente (con un metodo ai volumi finiti) le equazioni che modellano la reazione di combustione ed i fenomeni di trasporto, tenendo conto dinamicamente delle mutue interazioni tra i processi.

FDS è in grado di calcolare e conseguentemente fornire come dati di uscita, previo un opportuno set-up della simulazione in modo che le quantità di interesse vengano effettivamente calcolate, i valori di tutte le variabili, scalari e vettoriali, calcolate in ciascuna delle celle del dominio, utili alla comprensione dei fenomeni ed alla analisi degli effetti (concentrazioni delle specie chimiche, distribuzioni delle temperature / pressioni / velocità dei gas / fumi, visibilità, ...).

6 SCENARIO DI INCENDIO E FOCOLAIO CAMPIONE

6.1 Studio preliminare dei materiali combustibili presenti

È stata condotta una ispezione al fine di valutare la presenza di materiale combustibile nell'area di produzione contraddistinta da percorsi di esodo di lunghezza elevata.

La zona in questione si presenta caratterizzata da una generale ridotta presenza di materiale combustibile, ad eccezione di quanto descritto nel seguito.

È stato possibile identificare il maggiore carico di incendio come quello costituito dallo stoccaggio a bordo linea di materiale destinato all'imballo dei prodotti dolciari:

- 40 scatole da 6 kg ciascuna, in cartone ondulato e contenenti vaschette in polistirolo non espanso (*OPS, Solid Oriented Polystyrene*), per un totale di 240 kg;
- l'area della superficie occupata a pavimento dal materiale è di circa $3,5 \text{ m}^2$ (1 m per 3,5 m), per una altezza massima di 1,5 m.

Dalle informazioni raccolte, le condizioni riscontrate durante il sopralluogo effettuato sono tipiche e ben descrivono la presenza di materiali combustibili attesa nell'area di produzione in oggetto.

6.2 Definizione e set-up dello scenario di incendio

6.2.1 Definizione e set-up del fuoco campione

6.2.1.1 Reazione chimica

Avendo determinato la tipologia del materiale presente in prevalenza, è stato possibile definire la reazione chimica di combustione da utilizzare nel modello, in modo tale da prevedere la quantità di fumi prodotta dall'incendio ed il loro andamento spazio-temporale nel modo più accurato. A tal fine è stata utilizzata la reazione "polystyrene" contenuta nel database standard di FDS.

6.2.1.2 Combustibile

Per il modello del combustibile utilizzato nella simulazione si è fatto ricorso al materiale "PLASTIC A - FMRC Standard Plastic Commodity" definito nel database standard di FDS2. La *Standard Plastic Commodity* di Factory Mutual Research coincide sostanzialmente con il materiale oggetto dello studio, consistendo infatti in vaschette di polistirolo non espanso, in cartoni, su pallet in legno ([7], Troup, 1994; [8], [9] McGrattan et al., 1998).

Si noti che nel caso reale oggetto dello studio, i cartoni sono posati direttamente a terra e non su pallet, e quindi le condizioni di ventilazione ed esposizione della base del combustibile sono nella realtà meno favorevoli allo sviluppo dell'incendio di quelle previste nella simulazione: si è quindi nell'ipotesi conservativa in cui l'incendio simulato si sviluppa in condizioni più favorevoli che nella realtà.

6.2.1.3 Innesco

Per quanto riguarda l'accensione del combustibile, si è fatto ricorso ad una sorgente di modesta potenza, ma sufficiente a rendere possibile l'instaurarsi della combustione del materiale in tempi dell'ordine della decina di secondi ([4] McGrattan et al., 2001, p.41).

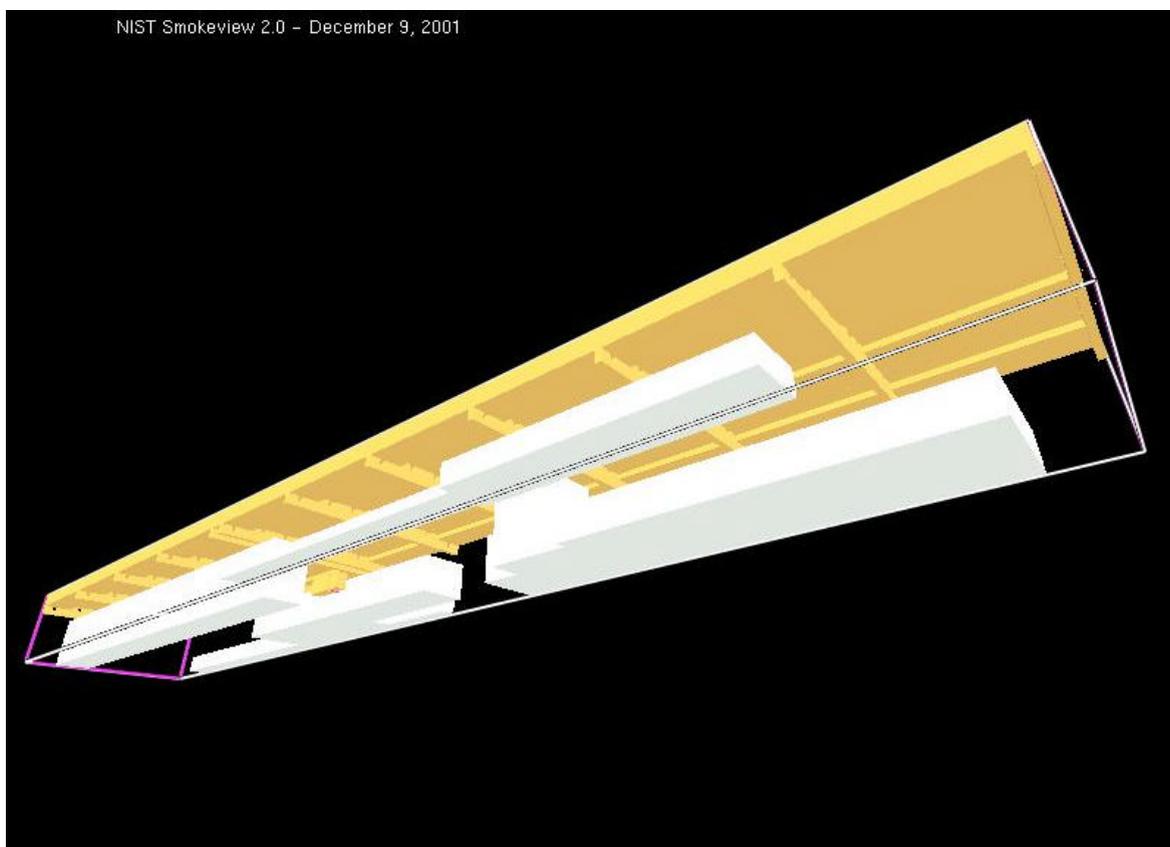


Figura 1. Dominio di simulazione: le pareti laterali ed il pavimento sono rese trasparenti in questa immagine per rendere più agevole la visualizzazione degli ingombri e dei dettagli della copertura.

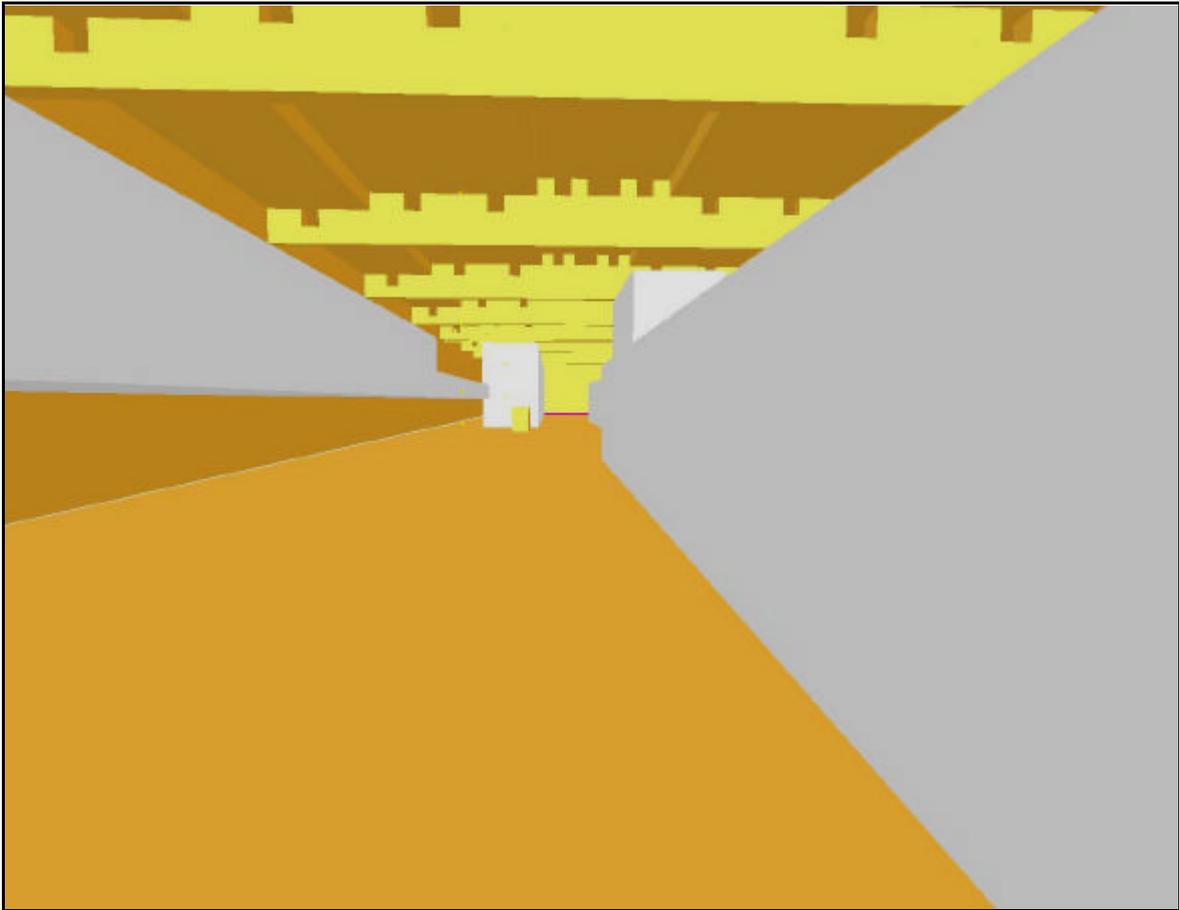


Figura 2. Particolare del dominio di simulazione.

È noto ([10] Drysdale D., 1998, p. 323) che nel caso di un fenomeno reale il tempo di incubazione dell'incendio è variabile e può dipendere da numerosi fattori, come ad esempio la natura dell'innesco, la sua posizione e le proprietà del primo elemento incendiato. Tuttavia, una volta raggiunta la temperatura di accensione del combustibile, lo sviluppo dinamico dell'incendio sino al valore di potenza erogata a regime può essere descritto mediante un profilo parabolico ([10] Drysdale D., 1998, p. 323; [11] Quintiere, 1998, p.123) secondo la relazione introdotta da Heskestad ([12] Heskestad, 1991):

$$\dot{Q} = \mathbf{a}(t - t_0)^2 \quad (1)$$

essendo \dot{Q} la potenza rilasciata dall'incendio, \mathbf{a} [kW/s²] un parametro di proporzionalità caratteristico del combustibile e della sua velocità di combustione, t il tempo e t_0 il tempo corrispondente alla lunghezza del periodo di incubazione.

Ne consegue che, come si vedrà in seguito, agli effetti della determinazione dei tempi di evacuazione non è significativa la durata della fase di incubazione - di cui nella realtà in generale non è possibile conoscere l'inizio e l'andamento - quanto piuttosto l'istante in cui l'incendio risulta essere rivelato, che a sua volta dipende con legge parabolica dall'istante in cui il combustibile viene coinvolto dal processo di combustione vero e proprio.

In definitiva, come sorgente di innesco dell'incendio, è stato utilizzato un focolaio della potenza costante di circa 60 kW a partire dall'istante $t=0$ e collocato in prossimità della base del materiale combustibile.

6.2.2 Definizione e set-up del dominio geometrico della simulazione

Durante il sopralluogo condotto presso lo stabilimento sono state raccolte le informazioni necessarie a caratterizzare la geometria dell'edificio, del suo contenuto e dei materiali strutturali. Il dominio della simulazione è costituito da una porzione di fabbricato di ampiezza pari a 20 m, lunghezza 122 m e copertura a doppia falda ottenuta mediante tegoli a doppio T poggiati su travi. L'altezza al culmine della trave è pari a 8.5 m; la quota sottotrave è pari a 6.7 m e l'altezza del dominio di simulazione è pari a 9 m.

FDS consente di descrivere il dominio di simulazione mediante una griglia tridimensionale di celle a forma di parallelepipedo. Tutti i particolari geometrici sono descrivibili lasciando le celle vuote o mediante l'introduzione di ostruzioni che vadano ad occupare una o più celle.

Il dominio di simulazione è stato suddiviso in 175'960 celle (243 per 40 per 18) di circa 0.5 m di lato: di conseguenza tutti i particolari geometrici sono rappresentabili con una risoluzione di circa 0.5 m.

Dalle immagini è possibile notare come gli elementi strutturali del timpano, in parte forati, siano stati inseriti nel modello perché essenziali al fine di ottenere un andamento dei fumi verosimilmente rispondente alla realtà. Inoltre, al fine di non sottostimare la velocità di stratificazione e di discesa dei fumi nell'ambiente, sono stati inclusi nella definizione del dominio geometrico i principali ingombri che, nello scopo e nei tempi della simulazione, possono essere considerati volumi non permeabili ai fumi.

Come detto in precedenza, il dominio di simulazione si sviluppa per circa 122 m nella direzione delle linee di produzione, con l'incendio collocato approssimativamente nel centro. Le condizioni al contorno alle estremità del dominio di simulazione, rispettivamente a circa 60 m dall'incendio in direzioni opposte, sono state modellate come "aperte" verso il resto dello stabilimento.

6.3 Verifica dei parametri di simulazione e del modello di fuoco campione

6.3.1 Verifica dei parametri di simulazione

La descrizione geometrica del dominio di simulazione è stata verificata mediante esecuzione di alcuni *run* di test del programma di simulazione e l'analisi grafica dei risultati con Smokeview (si veda il par. 5).

6.3.2 Verifica del modello di focolaio campione

È stata realizzata una serie di simulazioni a geometria ridotta, al fine di ottenere - in tempi brevi - risultati che consentissero lo studio e la verifica del modello del fuoco campione.

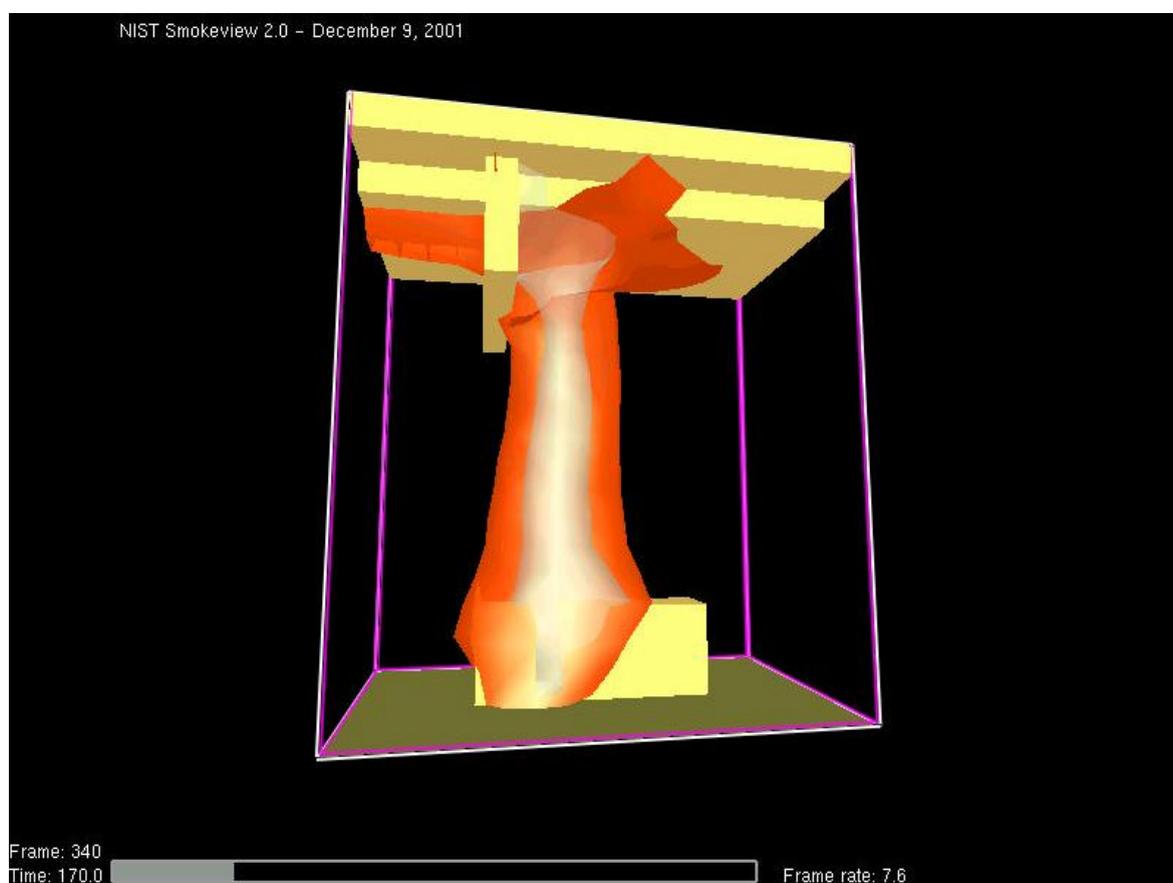


Figura 3. Dettaglio di simulazione del fuoco campione a geometria ridotta.

6.4 Esecuzione e verifica della simulazione di incendio

Una volta definito il dominio geometrico ed il modello di incendio, sono stati eseguiti alcuni *run* di verifica dell'assetto della simulazione, al fine di evidenziare eventuali comportamenti difformi da quanto atteso in base alla teoria della dinamica dell'incendio, senza peraltro riscontrare anomalie. Inoltre è stato necessario definire il tipo e le modalità di produzione e di visualizzazione dei dati prodotti dalla simulazione, scegliendo di produrre risultati sia sotto forma di tabelle con i parametri numerici di interesse, sia di immagini di più immediata interpretazione.

7 ANALISI DELLE PREVISIONI DEL MODELLO

7.1 Fasi temporali dello sviluppo dell'incendio in relazione all'esodo

7.1.1 Ignizione

Come già descritto al par. 6.2.1.3, per quanto riguarda la simulazione, la fase di innesco dell'incendio non è molto significativa in quanto per l'accensione è stata utilizzata una sorgente di modesta entità che, nell'ambito del range di potenza di incubazione dell'incendio, ha condotto all'accensione del combustibile in circa 28 secondi.

In realtà il processo di ignizione può essere immaginato con tempi e rampe di innesco differenti, ma si può ritenere che sostanzialmente lo sviluppo dell'incendio dal momento dell'accensione (sempre supposta con sorgente di limitata entità, tipicamente non superiore a 100 kW) segua il medesimo andamento.

7.1.2 Rivelazione dell'incendio

Nella zona oggetto della simulazione non sono presenti rivelatori di incendio automatici, tuttavia sono presenti pulsanti di allarme manuale. Di conseguenza, non essendo verosimile la possibilità che l'eventuale incendio reale venga rivelato fin dalle fasi precoci di incubazione, come istante di rivelazione si è assunto il momento in cui l'incendio produce fumo in quantità apprezzabile e fiamma, aumentato di un margine di 60 secondi (come si vedrà in seguito - Figura 5 -, in questi 60 secondi l'incendio, data la natura del combustibile, raggiunge già la potenza di circa 600 kW).

Nella scala di tempi della simulazione è quindi possibile assumere per l'istante di accensione t_0 , inteso come il momento in cui fiamma e fumo divengono visibili, (si veda il par. 6.2.1.3) il valore:

$$t_0 = 28 \text{ s} \quad (2)$$

riferito al tempo 0 di inizio della simulazione.

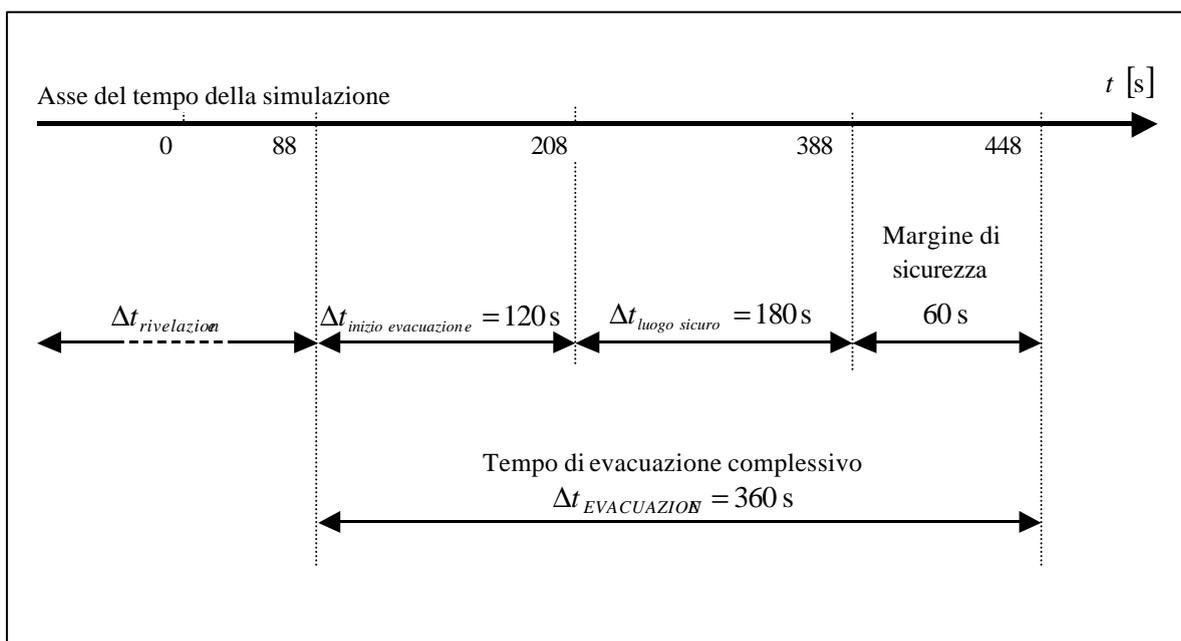


Figura 4. Schema dell'andamento temporale del processo di esodo.

L'istante di rivelazione dell'incendio $t_{\text{rivelazione incendio}}$ diviene così :

$$t_{\text{rivelazione incendio}} = 88\text{s} \quad (3)$$

7.1.3 Inizio del processo di evacuazione

È noto ([13] SFPE Handbook, 1995, sec. 3 chap. 14; [14] Vigne G., Marsella S., 2000) che tra l'istante di rivelazione dell'incendio ed il momento in cui il processo di evacuazione ha effettivamente inizio può intercorrere un ritardo che, dipendendo da molteplici fattori, può essere in generale stimabile in $60 \div 120$ secondi. Per quanto riguarda l'oggetto dello studio, l'intervallo di inizio evacuazione è stato conservativamente ritenuto pari a 2 minuti; di conseguenza è possibile indicare:

$$\Delta t_{\text{inizio evacuazione}} = 120\text{s} \quad (4)$$

7.1.4 Completa evacuazione

Il percorso di esodo più sfavorito è di lunghezza pari a 90 m. Assumendo in modo cautelativo che la velocità di spostamento sia pari a 0.5 m/s - valore inferiore alla metà del valore di velocità di esodo tipicamente accettato in letteratura per condizioni normali - è possibile determinare il tempo $\Delta t_{\text{luogo sicuro}}$ necessario per raggiungere un luogo sicuro a partire dalla postazione di lavoro più sfavorita:

$$\Delta t_{\text{luogo sicuro}} = 180\text{s} \quad (5)$$

7.1.5 Tempo di evacuazione complessivo

In base alle considerazioni svolte nei paragrafi precedenti, è possibile riassumere schematicamente l'andamento temporale del processo di esodo, avendo incluso un ulteriore margine di sicurezza pari a 60 secondi (Figura 4) ([15] La Malfa A., 2001):

È immediato ricavare che il tempo di evacuazione complessivo, considerato a partire dall'istante in cui l'incendio viene rivelato, può essere così determinato:

$$\Delta t_{\text{EVACUAZIONE}} = \Delta t_{\text{inizio evacuazione}} + \Delta t_{\text{luogo sicuro}} + \text{margine di sicurezza} = 120\text{s} + 180\text{s} + 60\text{s} = 360\text{s} \quad (6)$$

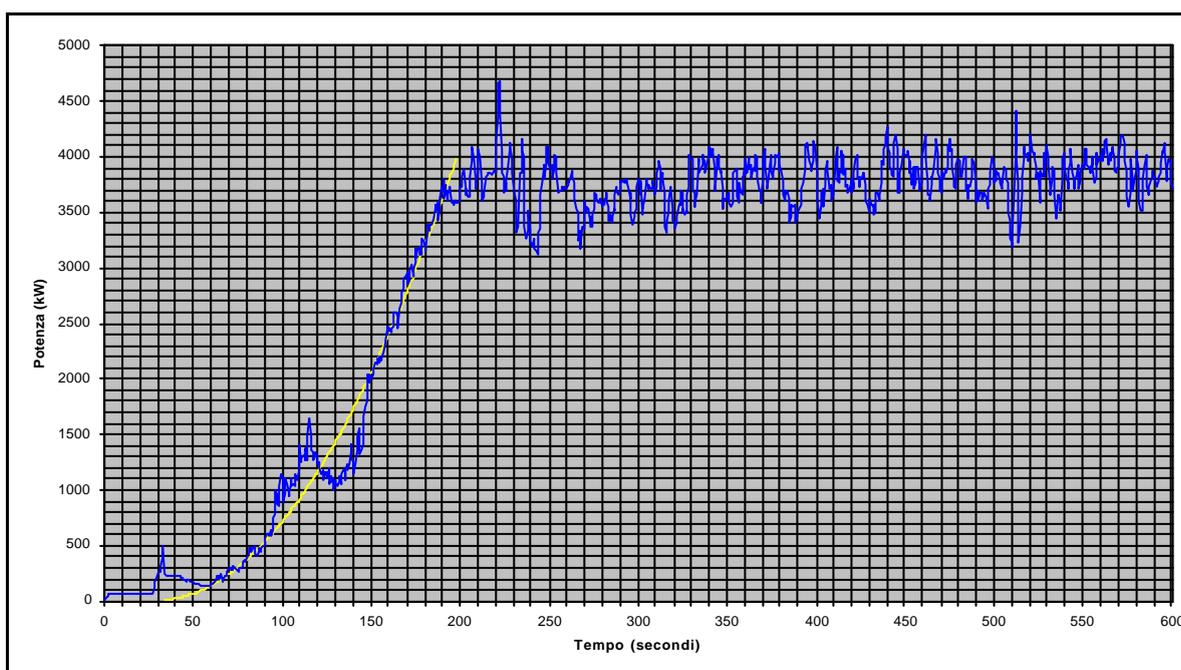


Figura 5. Andamento temporale della potenza rilasciata dall'incendio (blu) ed andamento parabolico teorico (giallo).

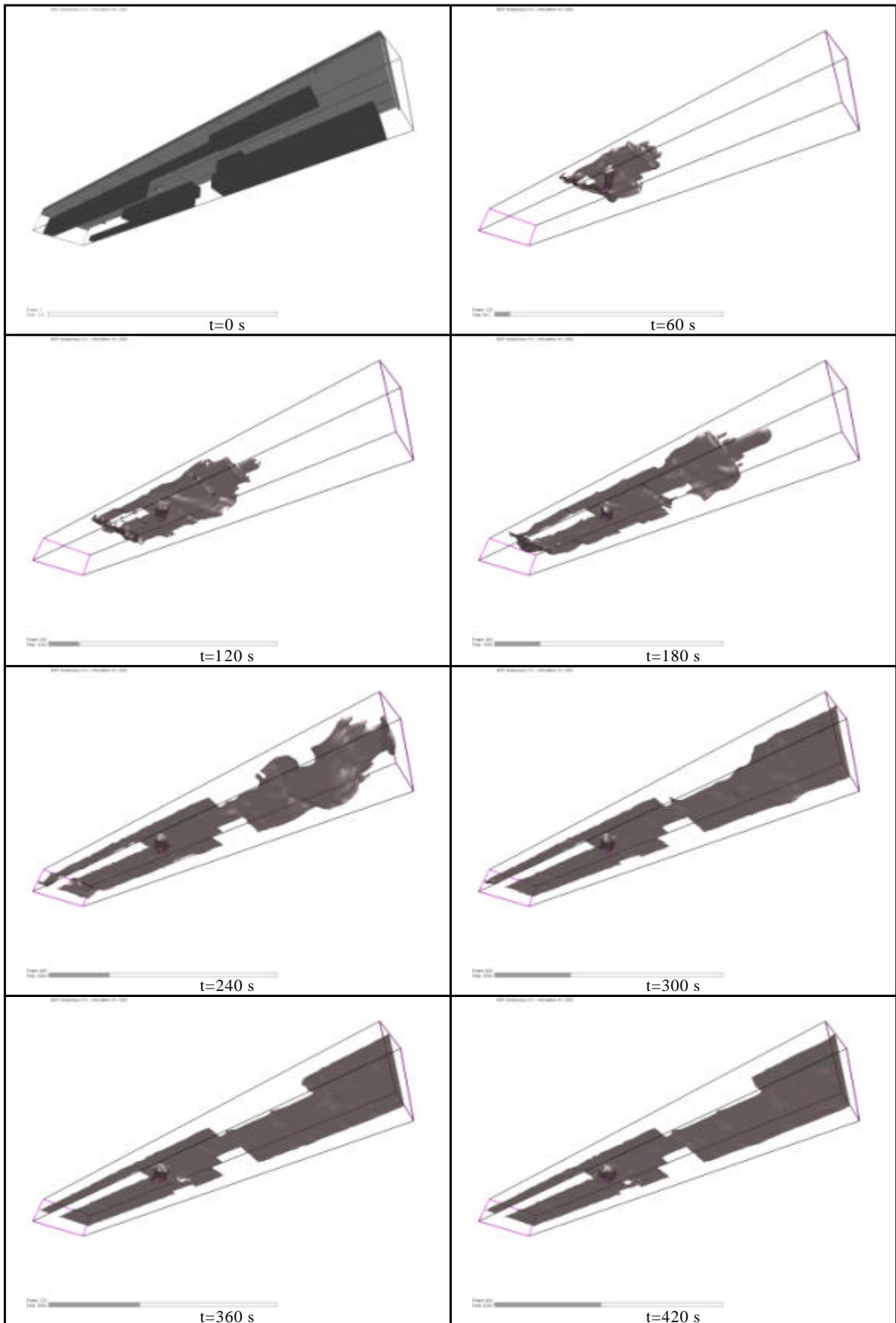


Figura 6. Immagini della distribuzione dei fumi ad intervalli di 60 secondi

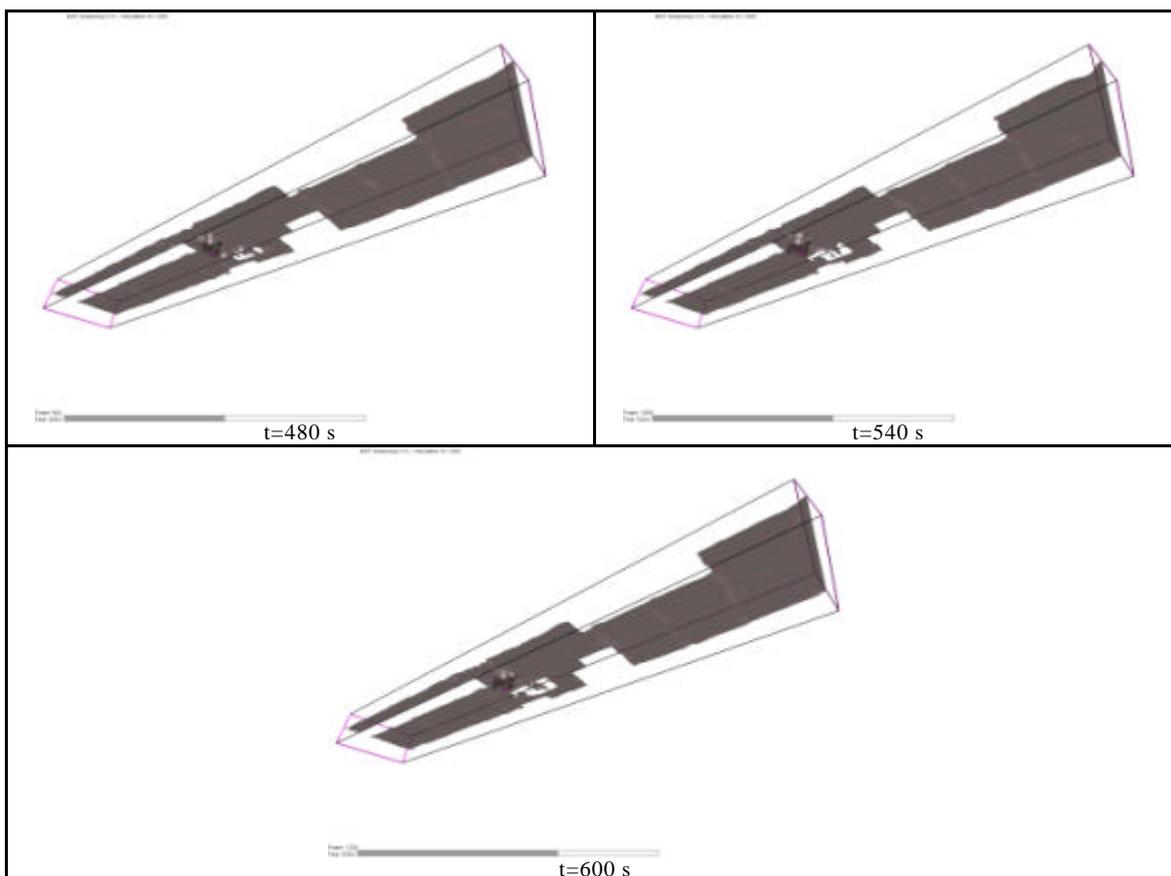


Figura 6 (continua). Immagini della distribuzione dei fumi ad intervalli di 60 secondi

È opportuno chiarire che il margine di sicurezza di 60 secondi indicato è da intendere quale valore minimo da garantire per consentire l'evacuazione in sicurezza: ciò non preclude che, come si vedrà nel seguito, al di là di quel tempo le condizioni di sicurezza si protragano comunque, anche se ciò non è richiesto ai fini di questo studio.

7.2 Potenza rilasciata

7.2.1 Andamento temporale della potenza rilasciata

Nel grafico riportato in Figura 5 è possibile valutare l'andamento temporale della potenza rilasciata dall'incendio simulato. Sono riportati i primi 10 minuti di simulazione (dei 15 totali), in cui l'incendio mostra il tipico andamento parabolico crescente sino al valore di circa 4 MW mantenuto a regime.

Come previsto in base a considerazioni teoriche (si veda anche il par. 6.2.1.3) la potenza rilasciata dall'incendio fino al raggiungimento del valore di regime segue un profilo parabolico, come evidenziato dalla curva indicata nel grafico. La costante di proporzionalità ricavata dai dati prodotti dalla simulazione assume il valore:

$$a = 0.1384 \frac{\text{kW}}{\text{s}^2} \quad (7)$$

In termini diversi ma equivalenti, il tempo caratteristico affinché la potenza rilasciata dall'incendio raggiunga il valore di 1 MW è pari a circa 85 secondi.

In base a queste considerazioni è possibile classificare la tipologia di sviluppo dell'incendio come "ultrafast" ([11] Quintiere, 1998, p.125; [10] Drysdale D., 1998, p. 324) come del resto era possibile ipotizzare in riferimento ai dati sperimentali ([7], Troup, 1994; [8], [9] McGrattan et al., 1998) disponibili a proposito di incendi di tipologie di materiale simili a quelli oggetto della simulazione.

7.2.2 Potenza rilasciata a regime

Da quanto indicato nel grafico di Figura 5, si apprezza come la potenza rilasciata dall'incendio, una volta esaurito il transitorio iniziale, si assesti attorno al valore di 4 MW. Ciò è in accordo con quanto riscontrabile dai dati sperimentali disponibili per tipologie di incendio relative a materiali simili ([7], Troup, 1994; [11] Quintiere, 1998).

8 VALUTAZIONE DELLA RISPONDENZA AI CRITERI PRESTAZIONALI

8.1 Andamento della distribuzione spazio-temporale dei fumi

Nelle immagini di Figura 6 è mostrata la distribuzione spaziale dei fumi ad intervalli di 60 secondi a partire dall'inizio della simulazione; in particolare le superfici delimitano porzioni del volume al di fuori delle quali la concentrazione di fumo ("soot": particolato prodotto dall'incendio) è trascurabile ai fini della visibilità. Si noti che per rendere agevole l'analisi delle immagini, la geometria degli elementi strutturali e delle ostruzioni, visibile nella figura corrispondente all'istante di inizio della simulazione, è stata poi resa trasparente.

8.2 Concentrazione di fumi e condizioni di visibilità al tempo di completa evacuazione

Nell'immagine di Figura 7 è possibile notare come la concentrazione di fumo, evidenziata nel piano verticale lungo il percorso delle vie di esodo all'istante di completa evacuazione, sia tale per cui nella parte bassa del dominio si mantengano condizioni di buona visibilità. Per ulteriore riferimento, si ricordi che l'altezza massima del dominio è pari a 9 metri.

Nella Tabella 1 è possibile valutare le concentrazioni di fumo relative a 3 posizioni poste lungo il dominio nel corridoio corrispondente alle vie di fuga, all'altezza di 2 e 5 m da terra (una in prossimità dell'incendio e due a circa 50 m di distanza dall'incendio verso le due estremità del dominio).

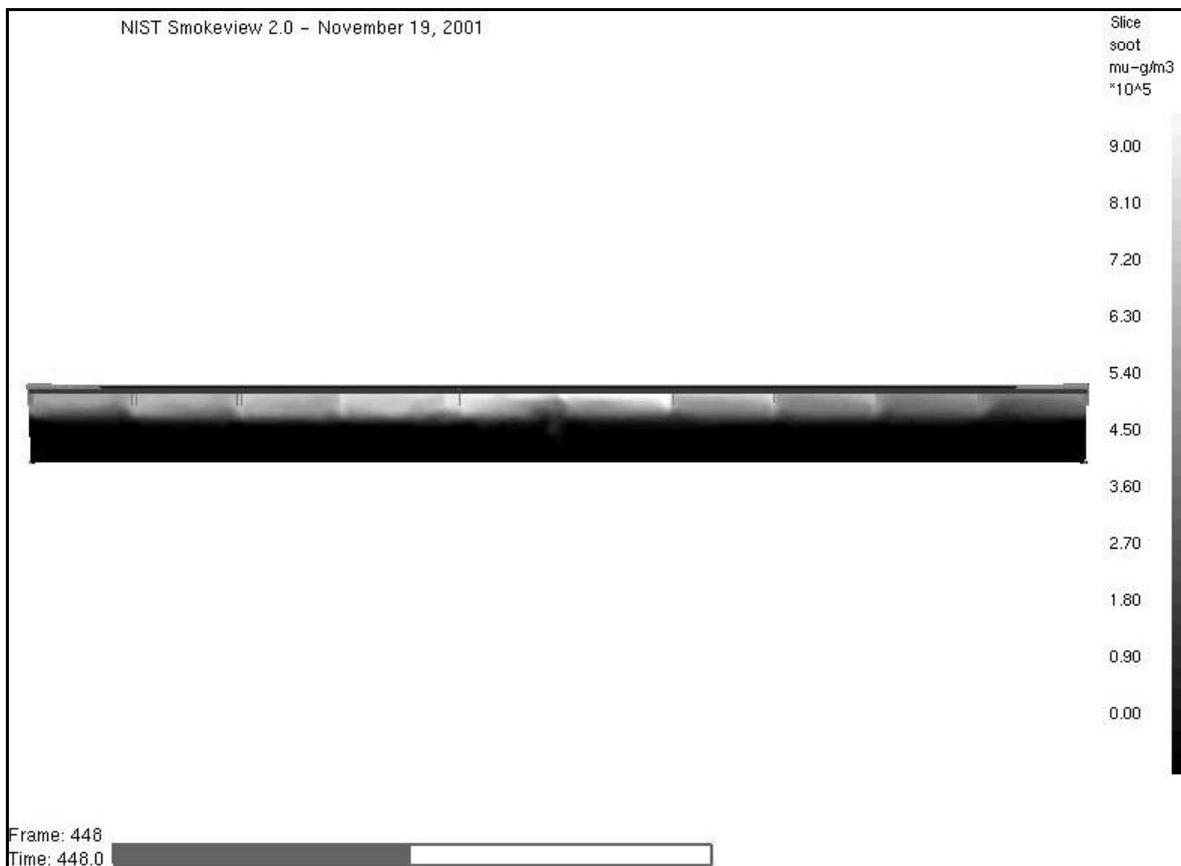


Figura 7. Concentrazione del fumo all'istante di completa evacuazione

Tabella 1. Concentrazione fumo valutate in 6 punti, posti a circa 50 metri ai lati dell'incendio ed in prossimità del focolaio, alle altezze di 2 e 5 metri.

Coordinate del punto di misura (x; y; z) [m]	Densità di fumo [g/m^3]					
	Valori a 2 m da terra			Valori a 5 m da terra		
	(12; 13; 2)	(60; 10; 2)	(110; 10; 2)	(12; 13; 5)	(60; 10; 5)	(110; 10; 5)
t=0 s	0	0	0	0	0	0
t=60 s	0	0	0	0	0	0
t=120 s	0	0	0	0	0	0
t=180 s	0	0	0	0	3,97E+04	3,98E+04
t=240 s	0	0	0	7,91E+04	9,77E+04	7,89E+04
t=300 s	0	0	0	9,83E+04	1,16E+05	1,18E+05
t=360 s	0	0	0	9,83E+04	1,54E+05	1,37E+05
t=420 s	0	0	0	1,37E+05	1,72E+05	1,56E+05
t=448 s	0	0	0	1,37E+05	1,79E+05	1,75E+05
t=480 s	0	0	0	1,37E+05	1,72E+05	1,75E+05

La visibilità, ovvero la capacità di vedere oggetti attraverso il fumo, può essere ricavata conoscendo concentrazione e caratteristiche di opacità del fumo.

Come è noto ([11] Quintiere, 1998, p.162; [10] Drysdale D., 1998, p. 381), l'intensità della luce monocromatica che attraversa la distanza L nel fumo è attenuata secondo la legge:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-K/L} \quad (8)$$

Il coefficiente di assorbimento K è ricavabile da un coefficiente di assorbimento riferito all'unità di massa K_m caratteristico del combustibile e dalla densità del fumo, calcolata dalla simulazione. È stato utilizzato il valore $K_m=7600 \text{ m}^2/\text{kg}$, valore opportuno per combustione con produzione di fiamma di legno e plastica ([4] McGrattan et al., 2001, p. 51).

La visibilità di un oggetto dipende inoltre dal tipo di illuminazione cui è sottoposto: nella simulazione, in via conservativa, si sono considerate le condizioni di visibilità riferite ad oggetti illuminati da fonti esterne.

Nella Tabella 2 è indicata la visibilità calcolata, relativa ai medesimi punti del caso precedente; si noti che il valore 300 m indica il limite di visibilità non perturbata dall'incendio assunto in questo caso dal programma.

Tabella 2. Condizioni di visibilità valutate in 6 punti, posti a circa 50 metri ai lati dell'incendio ed in prossimità del focolaio, alle altezze di 2 e 5 metri.

Coordinate del punto di misura (x; y; z) [m]	Visibilità [m]					
	Valori a 2 m da terra			Valori a 5 m da terra		
	(12; 13; 2)	(60; 10; 2)	(110; 10; 2)	(12; 13; 5)	(60; 10; 5)	(110; 10; 5)
t=0 s	300	300	300	300	300	300
t=60 s	300	300	300	300	300	300
t=120 s	300	300	300	300	300	300
t=180 s	300	300	300	300	9,95	9,91
t=240 s	300	300	300	4,99	4,04	5,01
t=300 s	300	300	300	4,02	3,39	3,36
t=360 s	300	300	300	4,02	2,56	2,89
t=420 s	300	300	300	2,88	2,29	2,53
t=448 s	300	300	300	2,88	2,21	2,26
t=480 s	300	300	300	2,88	2,29	2,26

8.3 Verifica del criterio prestazionale

In base a quanto indicato al paragrafo 4 ed ai risultati indicati nei paragrafi precedenti, è possibile affermare che all'istante di completa evacuazione la concentrazione di fumo prevista dalla simulazione è tale da consentire condizioni di visibilità superiori a 90 m, lunghezza del più sfavorito percorso di esodo.

9 CONSIDERAZIONI AGGIUNTIVE

Come già indicato, alcune considerazioni sviluppate durante lo studio si basano su ipotesi e presupposti che vengono qui di seguito riassunti.

9.1 Geometria

La geometria del caso reale è più complessa di quanto descrivibile dal modello. In prima approssimazione non sono stati inclusi nella simulazione alcuni torrioni statici di estrazione che sono presenti nell'area studiata, in virtù del fatto che nel caso reale essi costituirebbero una condizione favorevole allo smaltimento dei fumi.

Sono stati eseguiti alcuni *run* del medesimo scenario studiato con celle di dimensioni differenti, con lo scopo di valutare la sensibilità della simulazione al parametro griglia. Due test con celle di dimensioni tipiche rispettivamente 0.25 m e 0.35 m hanno mostrato buon accordo con la simulazione descritta precedentemente per quanto riguarda il valore a regime della potenza rilasciata, con valori comunque nel range di valori attesi in base ai dati sperimentali disponibili in letteratura. In entrambi i casi è stato ottenuto un ottimo accordo per ciò che riguarda l'andamento parabolico dell'incendio.

Inoltre, come descritto al par. 6.2.2, le condizioni al contorno alle estremità del dominio di simulazione sono state poste come "aperte" verso il resto dello stabilimento, non essendo presente una separazione fisica tra le aree. Al momento FDS 2.2 - che include la possibilità di utilizzare asseti multi-dominio - è ancora in fase di sviluppo. È prevista l'applicazione di FDS 2.2 al problema descritto, in modo tale che il resto dell'edificio possa essere incluso in una griglia più lasca, nell'intento di rimuovere questa ipotesi, pur mantenendo il numero totale di celle gestibile.

9.2 Materiali combustibili

Nello scopo e negli obiettivi del presente studio, si è assunto che i materiali e le apparecchiature circostanti non partecipino all'incendio, almeno entro i limiti temporali investigati dalla simulazione effettuata (10-15 minuti).

9.3 Prodotti di combustione

Sempre nei limiti dello scopo e degli obiettivi del presente studio, non sono stati analizzati l'irraggiamento e le concentrazioni di prodotti di combustione al di fuori del fumo, se non perché necessari alla elaborazione della simulazione. D'altro canto, nelle condizioni descritte, la visibilità dovuta al fumo può essere considerata il primo effetto in un incendio, ancor prima che l'incendio causi rischi di natura termica ([11] Quintiere, 1998, p.162).

10 CONCLUSIONI

È stato descritto uno studio di simulazione di incendio nell'area di produzione di uno stabilimento industriale. L'analisi è stata svolta applicando la versione 2 di FDS, modello CFD sviluppato dal NIST. Lo studio ha lo scopo di prevedere la diffusione dei fumi dovuta ad un incendio campione, con l'obiettivo di valutare la visibilità dovuta alla concentrazione di fumo lungo la più sfavorita via di esodo, pari a circa 90 m di lunghezza. La simulazione ha previsto che la visibilità lungo la via di esodo al tempo di completa evacuazione può essere assunta superiore a 90 m.

11 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Aprili P.G., Daquino G., Franciotti D., Zappellini G., Ferrari A., *CFD Simulations of a Truck Fire in the Underground Gran Sasso National Laboratory*, ESREL 2001 - Towards a safer world - Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability - Torino, 16-20 settembre 2001.
- [2] *SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection Analysis and Design of Buildings*, Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, MD, 2000.
- [3] McGrattan K.B., Baum H.R., Rehm G.P., Forney G.P., Floyd J.E., Hostikka S., *Fire Dynamics Simulator (Version 2), Technical Reference Guide*, - Technical Report NISTIR 6783, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, November 2001.
- [4] McGrattan K.B., Forney G.P., Floyd J.E., Hostikka S., *Fire Dynamics Simulator (Version 2) User's Guide*, - Technical Report NISTIR 6784, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, November 2001.

- [5] McGrattan K.B., Forney G.P., *User's Guide for Smokeview Version 2.0 - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data*, - Technical Report NISTIR 6761, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, July 2001.
- [6] <http://fire.nist.gov> - *BFRL: Fire on the Web*
- [7] Troup J.M.A., *Large-Scale Fire Tests of Rack Stored Group A Plastics in Retail Operation Scenarios Protected by Extra Large Orifice (ELO) Sprinklers*. Technical Report FMRC J.I. 0X1R0.RR, Factory Mutual Research Corporation, Norwood, Massachusetts, November 1994. Prepared for Group A Plastics Committee, Lansdale, Pennsylvania.
- [8] McGrattan K.B., Sheppard D.T., *Large Scale Tests of Sprinkler, Vent, Draft Curtain Interaction*, Technical Report, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
- [9] McGrattan K.B., Hamins A., Stroup D., *Sprinkler, Smoke & Heat Vent, Draft Curtain Inter-action — Large Scale Experiments and Model Development*, Technical Report NISTIR 6196-1, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, September 1998.
- [10] Drysdale D., *An Introduction to Fire Dynamics - Second Edition*, John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England, 1998.
- [11] Quintiere J.G., *Principles of Fire Behavior*, Delmar Publishers, Albany, New York, 1998.
- [12] Heskestad G., *Venting Practices*, sec. 6, chap. 10 in *Fire Protection Handbook*, 17th ed., edited by A.E. Cote and J.L. Linville, Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1991, 6.104-6.116.
- [13] *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Second Edition, edited by Philip J. DiNenno, Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, MD, 1995.
- [14] Vigne G., Marsella S., *L'Approccio Ingegneristico alla Sicurezza Antincendio nel Sistema Normativo Italiano*, in *Antincendio*, EPC Roma, Gennaio 2001.
- [15] La Malfa A., *Analisi delle Condizioni di Sicurezza delle Vie di Esodo Secondo L'approccio Ingegneristico*, Atti del convegno Fire Safety Engineering: un Nuovo Approccio alla Prevenzione Incendi, INFORMA, Roma, 29 novembre 2001.
- [16] Babrauskas V., *Burning Rates*, in P. J. DiNenno, C. L. Beyler, R. L. P. Custer, W. D. Walton, J. M. Watts, D. Drysdale, & J. R. Hall (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 3-1-3-15), Quincy, MA: SFPE, 1995.