

VERIFICA MEDIANTE APPROCCIO PRESTAZIONALE DI MISURE DI SICUREZZA EQUIVALENTI DI TIPO PRESCRITTIVO INDIVIDUATE IN MODO EMPIRICO NELL'AMBITO DI UN PROCEDIMENTO DI DEROGA PER AUTORIMESSE.

Prof. P. Masini¹, Ingg. M. Romano¹, M. Castore¹, L. Pappalettera¹, R. Pavia¹, M. Saracino², A. Basti³.

¹**Politecnico di Bari - C.R.C.A-** Centro di Ricerca e Certificazione materiali e sistemi Antincendio

Via E. Orabona, n.4-70125- Bari, Italia - Tel 080.5963.484-Fax 080.5963414 –e-mail: p.masini@poliba.it,

²**Direzione Regionale Vigili Del Fuoco Puglia**

V.le Japigia, Bari, e-mail: michele.saracino@vigilfuoco.it

³**I.N.F.N.** - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Laboratori Nazionale del Gran Sasso - L'Aquila

SOMMARIO

Dall'analisi statistica delle tipologie di pratiche di prevenzione incendi in deroga alle normative vigenti (ex art. 6 del D.P.R. 37/98), sottoposte all'esame del Comitato Tecnico Regionale (C.T.R.) della Puglia è emerso che in media, oltre il 75 % è rappresentato da attività di autorimessa, così come definita al punto 92 dell'elenco allegato al D.M. 16.02.1982. Di queste, circa il 25% afferiscono a carenza di superfici di ventilazione naturale (rif. Punto 3.9.1 del D.M. 1.02.1986).

L'approccio al problema è sempre stato di tipo "prescrittivo", intendendo superata o superabile la carenza di ventilazione naturale, mediante la previsione di impianti di ventilazione meccanica, in genere, attivati manualmente e/o asserviti sia a rilevatori di concentrazione di CO e miscele potenzialmente infiammabili, sia da impianti di rivelazione automatica di incendio. Le caratteristiche richieste agli impianti di ventilazione meccanica sono genericamente indicate nella capacità di consentire almeno 3 ricambi orari di volumi di aria ambiente.

Poiché tale consuetudine appare semplicistica e generale, in relazione alle particolarità specifiche dei singoli casi, nonché sulla effettiva efficacia di tali impianti in condizioni di incendio reale ed alla loro efficienza nel tempo, si è ritenuto opportuno approfondire la problematica anche con l'innovativo approccio di tipo ingegneristico, introdotto dal D.M. 9.05.2007 – *"Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio"*.

Nel presente studio, quindi, su base empirica e sviluppando alcuni aspetti anche derivati dalla regola tecnica vigente (D.M. 1.02.1986), sono stati identificati alcuni parametri, ritenuti caratteristici della specifica situazione ed assunti alla base di criteri oggettivi, utili per la definizione delle prestazioni da richiedere agli impianti di ventilazione meccanica.

Si è proceduto, poi, mediante l'approccio prestazionale ed implementando il modello denominato FDS acronimo di Fire Dynamics Simulator sviluppato dal NIST National Institute of Standard and Technology, alla valutazione quantitativa del livello di sicurezza antincendio, rispetto a determinate soglie prestazionali.

In particolare, considerando una autorimessa ubicata al primo piano interrato e con capacità di parcheggio inferiore a 125 autoveicoli, tale valutazione è stata effettuata considerando due casi distinti:

- 1) condizioni di carenza di ventilazione ed adozione dell'impianto di ventilazione meccanica con prestazioni definite mediante criterio empirico-prescrittivo
- 2) condizioni di ventilazione naturale conformi alla regola tecnica vigente.

Dall'analisi dei risultati è stato possibile constatare la parziale efficacia del sistema di ventilazione meccanica considerato, pertanto, ai fini del soddisfacimento degli obiettivi di sicurezza, risulta opportuno proseguire lo studio effettuando una revisione del dimensionamento dell'impianto stesso.

1. INTRODUZIONE

Le problematiche di sicurezza antincendio per le "Autorimesse", vengono affrontate, nel rispetto delle indicazioni prescrittive previste dalla regola tecnica di riferimento (D.M. 1/2/86).

Si è osservato che, nella pratica corrente, un numero rilevante di autorimesse esistenti, ai fini dell'adeguamento alle norme di prevenzione incendi, vengono sottoposte a procedimento di deroga (ex art. 6 del D.P.R. 37/98) per motivi legati a carenza del sistema di ventilazione naturale.

In molti casi il C.T.R. (ex art. 20 del D.P.R. 577/82) ha considerato accettabile, quale misura di sicurezza alternativa, la previsione di un impianto di ventilazione meccanica in grado di assicurare almeno 3 ricambi orari di aria ambiente e realizzato in conformità a quanto prescritto al punto 3.9.1 del D.M. 1/2/86.

In generale, l'adozione di un impianto di ventilazione meccanica è finalizzata ad assolvere alla duplice funzione di impedire la formazione di miscele pericolose e smaltire gli effluenti derivanti da un eventuale incendio (fumo e calore).

Poiché, tale misura compensativa non tiene conto delle specificità delle condizioni reali (superficie di ventilazione naturale disponibile, geometria dei locali, tipologia dell'autorimessa, ecc.), che influenzano l'evoluzione dinamica dell'incendio, nel presente studio, considerato un caso reale, una autorimessa ubicata al primo piano interrato e con capacità di parcheggio inferiore a 125 autoveicoli, rappresentativo delle principali tipologie di autorimessa riscontrabili nella pratica ordinaria, si è cercato di identificare, su base empirica e sviluppando alcuni aspetti derivati dalla regola tecnica vigente (D.M. 1.02.1986), alcuni parametri, caratteristici della specifica situazione, da assumere alla base di criteri oggettivi, utili per la definizione delle prestazioni da richiedere agli impianti di ventilazione meccanica.

Si è proceduto, poi, rispetto a prestabilite soglie di accettabilità, alla valutazione quantitativa, mediante l'approccio prestazionale del livello di sicurezza antincendio, considerando due casi distinti:

- 1) condizioni di carenza di ventilazione ed adozione dell'impianto di ventilazione meccanica con prestazioni definite mediante criterio empirico-prescrittivo
- 2) condizioni di ventilazione naturale conformi alla regola tecnica vigente.

L'obiettivo del presente lavoro è stato, dunque, la verifica in termini prestazionali di alcune misure di sicurezza equivalenti nell'ambito di un processo di deroga per autorimesse, attraverso l'applicazione di un modello previsionale d'incendio di tipo deterministico ascrivibile alla categoria dei modelli di campo.

I modelli di campo forniscono la stima dell'evoluzione dell'incendio in un compartimento per via numerica, suddividendo il dominio geometrico entro il quale si sviluppa l'incendio in un gran numero di celle tridimensionali (computational grid) e applicando i principi di conservazione dell'energia, della massa, della quantità di moto e delle specie chimiche. Intrinsecamente accoppiati al moto fluidodinamico, vi sono però, fenomeni termo-chimici per cui i modelli di campo più evoluti associano all'equazioni di Navier-Stokes, oltre ad un proprio modello di turbolenza, anche uno di combustione e di radiazione per la simulazione dell'evoluzione dinamica dell'incendio. Le equazioni differenziali alle derivate parziali non lineari che ne derivano e che modellano i flussi turbolenti di un fluido, molto spesso considerato incomprimibile, sono discretizzate e risolte mediante opportuni algoritmi. Essi consentono, pertanto, entro i limiti propri degli attuali modelli di combustione e di turbolenza, una descrizione dettagliata e verosimile delle caratteristiche tridimensionali del moto dei fluidi indotti dall'incendio, in domini geometrici comunque complessi ed in condizioni di flusso diverse.[1]

In questo lavoro, è stato utilizzato un modello di campo denominato FDS acronimo di Fire Dynamics Simulator sviluppato dal NIST National Institute of Standard and Technology [2] che, per prospettati scenari ritenuti gravosi, consente una valutazione quantitativa del livello di sicurezza antincendio rispetto a determinate soglie prestazionali.

2. DEFINIZIONE DELLE PRESTAZIONI DA RICHIEDERE ALL' IMPIANTO DI VENTILAZIONE MECCANICA MEDIANTE CRITERIO EMPIRICO - PRESCRITTIVO

La regola tecnica (DM 1/2/86) ai punti 3.9.2 e 3.9.3 definisce i casi in cui, in funzione del numero di autoveicoli presenti nell'autorimessa è sufficiente la sola ventilazione naturale pari ad 1/25 della superficie in pianta del locale, ovvero i casi in cui ad essa deve essere associato un impianto di ventilazione meccanica con almeno 3 ricambi di volume ambiente orari.

Nel presente studio, in riferimento ad autorimesse rientranti nei casi in cui la regola tecnica non obbliga espressamente l'installazione di un impianto di ventilazione meccanica, per valori del numero di autoveicoli minore o uguale al valore limite di riferimento, si è ritenuto lecito, in prima approssimazione, assumere che la disposizione di vani di aerazione naturale di superficie complessiva non inferiore ad 1/25 della superficie

in pianta del locale possa equivalere, ai fini antincendio, agli effetti derivanti da un impianto di ventilazione meccanica di portata non inferiore a 3 ricambi di volume ambiente orari.

Viceversa, si è ritenuto plausibile considerare che 1 m² di ventilazione naturale possa risultare sufficiente a smaltire gli effluenti di combustione relativi a 25 m² di superficie in pianta dell'autorimessa.

Con una ulteriore astrazione, è stato considerato che nei casi in deroga per carenza di ventilazione naturale si può raggiungere una situazione equivalente a quella prescritta dalla norma, incrementando la portata minima da assicurare all'impianto di ventilazione meccanica dell'equivalente di 3 ricambi orari di volume ambiente non coperto dalla ventilazione naturale disponibile.

A tal riguardo si può scrivere: $A_T = A_p + A_c$ (1)

Ove

A_T = superficie totale lorda dell'autorimessa;

$A_p = 25 A_w$ = superficie ipotetica protetta dalla ventilazione naturale esistente;

A_w = superficie complessiva di ventilazione disponibile;

A_c = quota della superficie a pavimento carente di ventilazione

$$A_T = 25 A_w + A_c \quad (2)$$

$$1 = 25 \cdot A_w / A_T + A_c / A_T \quad (3)$$

Posto $f = A_w / A_T$ si ha:

$$A_c = (1 - 25f) A_T \quad (4)$$

Se si suppone che il locale abbia altezza h costante, la relazione (4) diventa: $h A_c = (1 - 25f) h A_T$
ossia :

$$V_c = (1 - 25f) V_T \quad (5)$$

Ove V_T = volume ambiente;

V_c = quota parte del volume ambiente non coperto da ventilazione naturale.

L'incremento di portata da assicurare all'impianto è dato da:

$$Q_c = 3 V_c / \text{ora} = 3(1 - 25f) V_T / \text{ora}$$

Si può, quindi, in funzione della superficie di ventilazione disponibile, rispetto alla superficie totale dell'autorimessa, definire i ricambi orari richiesti all'impianto, con l'espressione:

$$Q_T = 3(1 - 25f) V_T / \text{ora} + 3 V_T / \text{ora} = 3(2 - 25f) V_T / \text{ora}$$

Tab.1 Portata richiesta all'impianto meccanico in termini di volumi ambiente per differenti rapporti di ventilazione

$f = A_w / A_T$	$A_c / A_T = (1 - 25f)$	$Q_c = 3(1 - 25f) V_T / \text{ora}$	Portata richiesta all'impianto meccanico in termini di volumi ambiente: $Q_T = 3(2 - 25f) V_T / \text{ora}$
1/25	0	0	3
1/30	0.167	0.5	3.5
1/40	0.375	1.125	4.125
1/50	0.5	1.5	4.5
1/60	0.58	1.75	4.75
1/70	0.64	1.93	4.93
1/80	0.69	2.06	5.06
1/90	0.72	2.17	5.17
1/100	0.75	2.25	5.25

3. IL MODELLO DI CAMPO FDS

Per la valutazione del livello di sicurezza è stato adottato il codice denominato FDS acronimo di Fire Dynamics Simulator sviluppato dal NIST National Institute of Standard and Technology [2].

Il modello matematico implementa le equazioni di Navier-Stokes per un fluido newtoniano per bassi numeri di Mach sviluppato da Rhem and Baum [2],[3],[4],[5], mentre la turbolenza viene risolta con simulazioni

accurate di tipo LES (Large Eddy Simulation) [2],[6],[7] con modello di Sub-Grid Scale di Smagorinsky [5],[16].

Inoltre si adotta per la combustione un modello 'Mixture Fraction'[5],[8] mentre la radiazione termica è modellata attraverso l'equazione di trasporto dell'energia termica radiante RTE Radiative Transfer Equation [2],[9].

L'integrazione numerica delle equazioni di Navier-Stokes incontra difficoltà legate alla turbolenza del flusso poiché questa dà luogo ad un ampio spettro continuo di strutture spaziali turbolente a ciascuna banda del quale è associato consequenzialmente un determinato contenuto energetico. Ne deriva che la griglia di calcolo, su cui vengono discretizzate le equazioni di Navier-Stokes che descrivono il moto del fluido, deve avere dunque una spaziatura inferiore alle più piccole scale dissipative, mentre la discretizzazione temporale delle equazioni deve poter catturare le più elevate frequenze associate alle scale più piccole. Si rileva però, che le strutture spaziali turbolente più grandi sono fortemente condizionate dal flusso considerato, ovvero dalle condizioni al contorno e dalla geometria del sistema, mentre le più piccole strutture spaziali, responsabili essenzialmente della diffusione e dissipazione dell'energia meccanica, rivestono carattere di universalità. Tali premesse sono alla base della definizione dell'approccio computazionale LES ((Large Eddy Simulation) in cui il moto delle strutture di grande scala viene risolto in modo esplicito con le equazioni di Navier-Stokes, mentre al modello sub-grid è affidato il compito di riprodurre gli effetti delle sole strutture di piccola scala .

Con la LES, la griglia di discretizzazione può essere nettamente meno fitta rispetto a quella necessaria nella DNS (Direct numerical simulation) poiché vengono simulate solo le scale maggiori del moto turbolento; per questo motivo le risorse computazionali richieste non sono così elevate come nel caso della DNS.

Nel modello sub-grid di Smagorinsky, la viscosità μ viene modellata tramite la seguente espressione :

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left(2 \bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

dove C_s è una costante empirica e Δ è una lunghezza dell'ordine delle dimensioni di una cella della mesh. La barra su alcune quantità denota che questi sono valori risolti, o filtrati, cioè sono stati calcolati su una mesh numerica. A partire dalla viscosità turbolenta modellata μ , gli altri parametri di diffusione, la conduttività termica k e la diffusività materiale, vengono calcolate tramite i numeri di Prandtl e Schmidt, caratteristici del flusso:

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} C_p}{Pr}$$

$$(\rho D)_{l,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc}$$

L'utilizzo del modello FDS per la simulazione dello sviluppo di un incendio in un dato ambiente è articolato in fasi come di seguito riportate:

- caratterizzazione dello scenario incidentale;
- definizione della curva di rilascio di potenza dell'incendio;
- definizione delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali costruttivi e non;
- reazione chimica di combustione;
- definizione il dominio di simulazione;
- discretizzazione del dominio di simulazione ;
- implementazione geometrica dell'ambiente oggetto della simulazione;
- definizione delle condizioni al contorno;
- run della simulazione;
- analisi dei risultati.

4. APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO PRESTAZIONALE

4.1 Analisi preliminare

Il presente lavoro ha per oggetto la valutazione quantitativa del livello di sicurezza antincendio, rispetto a determinate soglie prestazionali e l'analisi dei risultati ottenuti dalla simulazione dello sviluppo di un incendio in un box auto di un'autorimessa sottoposta a procedimento di deroga (ex art. 6 del D.P.R. 37/98) per motivi legati a carenza del sistema di ventilazione naturale.

In particolare, considerando una autorimessa ubicata al primo piano interrato e con capacità di parcheggio inferiore a 125 autoveicoli, tale valutazione è stata effettuata considerando due casi di studio distinti:

- 1) condizioni di carenza di ventilazione ed adozione dell'impianto di ventilazione meccanica con prestazioni definite mediante criterio empirico-prescrittivo;
- 2) condizioni di ventilazione naturale conformi alla regola tecnica vigente;

CASO DI STUDIO 1)

L'autorimessa considerata ha una superficie in pianta $A_T=1845 \text{ mq}$ e volume $V_T=5535 \text{ m}^3$;

La superficie di ventilazione richiesta (ex art. 3.9.1 del D.M. 1/2/1986) è $A_{WT} = A_T/25 = 73.82 \text{ mq}$ mentre la superficie di ventilazione disponibile è pari ad $A_W=35.3 \text{ mq}$.

Il rapporto di ventilazione che si realizza è dunque $f = A_T/A_W = 1/52$.

Per tale autorimessa, quale misura di sicurezza alternativa, è stata considerata l'adozione di un impianto di ventilazione meccanica che assicuri una portata in termini di volumi ambiente pari a

$$Q_T = 3 \cdot (2 - 25f) \cdot V_T / h = 4.56 \text{ } V_T/h$$

ovvero una portata $Q_T = 5535 \cdot 4.56 = 25240 \text{ m}^3/h = 7 \text{ m}^3/s$.

L'impianto prevede 11 bocchette di dimensioni $0.3 \cdot 0.20 = 0.06 \text{ m}^2$, ciascuna delle quali dimensionata per aspirare una portata di $0.64 \text{ m}^3/s$. (Fig. 1)

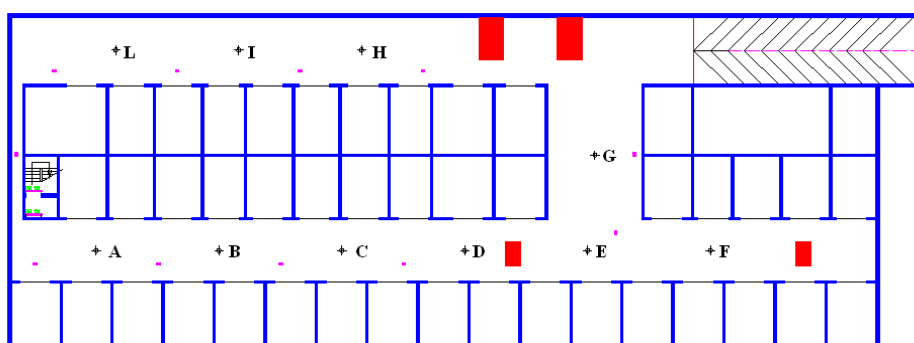


Fig. 1 - Planimetria dell'autorimessa con relativa indicazione delle superfici di ventilazione naturale e delle bocchette di aspirazione dell'impianto di ventilazione meccanica.

4.1.1 Identificazione degli obiettivi di sicurezza antincendio

Gli obiettivi della sicurezza antincendio devono assicurare che :

- a) gli occupanti siano in grado di lasciare l'edificio in condizioni di sicurezza;
- b) le squadre di soccorso pubblico siano in grado di operare in condizioni di ragionevole sicurezza.

4.1.2 Individuazione dei livelli di prestazione

In relazione agli obiettivi di sicurezza individuati si assumono quali parametri significativi di riferimento per il soddisfacimento degli stessi obiettivi, la visibilità, la concentrazione del monossido di carbonio e dell'ossigeno, la temperatura dei fumi.

La tabella 2 riporta i relativi livelli di prestazione quantificati [10],[11], [12].

Tab. 2 Livelli di prestazione

Livelli prestazionali	
Visibilità	10 m
Temperatura	50 °C
Monossido di carbonio	500 ppm
Ossigeno	15 %

In generale i parametri di riferimento devono mantenersi entro le soglie di accettabilità per un intervallo di tempo pari a 240 secondi, assunto come valido per consentire l'esodo degli occupanti ed ottenuto assumendo una velocità di esodo pari a 0.25 m/s (come indicato dal D.M 10/03/1998 per le aree a rischio incendio medio).

4.2 Analisi quantitativa

L'implementazione del modello di simulazione, adottando il codice denominato FDS [2], è stata articolata in fasi, come di seguito descritte.

4.2.1 Scenario d'incendio e definizione della curva di rilascio di potenza dell'incendio HRR

La simulazione è stata effettuata considerando l'ipotetico scenario caratterizzato dall'incendio di una macchina situata in un box, come evidenziato nella figura 2 .

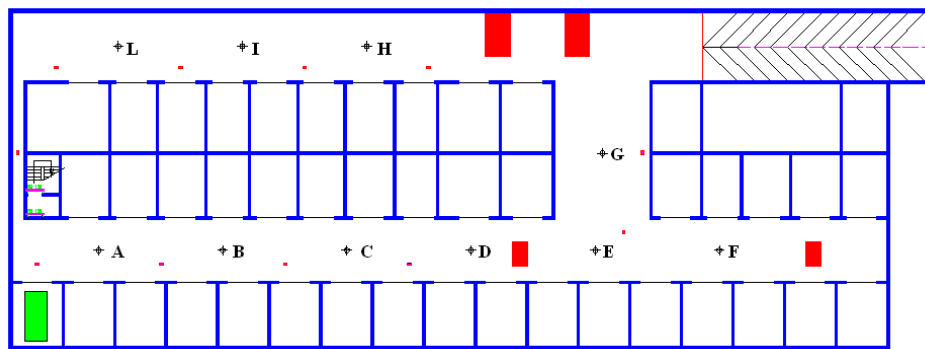


Fig. 2 Planimetria dell'autorimessa con indicazione del box interessato dall'incendio.

La potenza termica rilasciata dai processi di combustione durante un incendio dipende dalla velocità di pirolisi dei materiali combustibili e dalla possibilità che i gas prodotti possano effettivamente bruciare in base alla disponibilità di ossigeno. La velocità di pirolisi risulta di difficile determinazione perché dipende, oltre che dalle caratteristiche del combustibile, anche dalle condizioni ambientali indotte dallo stesso incendio, in particolare dal flusso radiativo di ritorno proveniente dalle pareti e dai gas caldi.

L'FDS dispone di un tal modello di combustione, tuttavia, i risultati sono fortemente dipendenti dalle proprietà radiative delle pareti circostanti il focolare, per cui, risultati attendibili possono ottenersi solo conoscendo dettagliatamente tali proprietà [13],[14].

In realtà, poiché raramente sono disponibili informazioni così precise, si preferisce seguire un'altra strada resa disponibile dal modello FDS, cioè assegnare direttamente la curva della potenza termica rilasciata HRR, salvo la possibilità di verificare che la quantità di ossigeno presente consenta il rilascio della prevista potenza termica. Studi di validazione condotti dal NIST hanno dimostrato che, seguendo tale approccio, le proprietà radiative delle pareti non hanno un significativo impatto sui risultati [15].

In ogni caso, la curva del rilascio termico fornita come dato di input influenza pesantemente i risultati forniti dal programma di simulazione, pertanto si richiede una consolidata esperienza nell'assegnare la curva HRR. Nel presente lavoro si è fatto riferimento alla curva di rilascio termico HRR-t, (Fig. 3) derivante dalla sperimentazione in scala reale su macchine, condotta dal CTICM -Departement Incendie et Essais France- [16] nel 1995 e 1996, in condizioni diverse di ventilazione, facendo uso di un calorimetro.

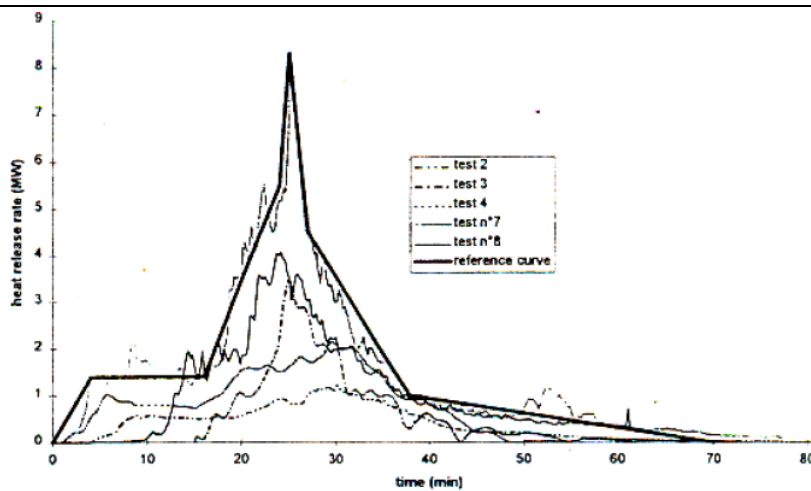


Fig. 3 Curve HRR-t rilevate sperimentalmente in cinque test reali d’incendio di macchine e relativa curva d’inviluppo [17]

Time [min]	HRR [MW]
0	0
4	1.4
16	1.4
24	5.5
25	8.3
27	4.5
38	1
70	0

Per poter valutare le condizioni di sostenibilità durante l’incendio, sono stati collocati nel dominio fisico della simulazione, nelle posizioni denominate A, B, C, D, E, E F, G (Fig.2), dei punti di rilevamento delle grandezze di interesse ovvero della temperatura, visibilità, ossigeno e monossido di carbonio.

4.2.2 Definizione della reazione chimica di combustione e definizione delle caratteristiche termo-fisiche dei materiali.

Lo scenario di interesse è rappresentato dallo sviluppo di incendio di una macchina, innescato nel vano motore e che coinvolge più materiali di differenti proprietà termo-fisiche e di differente comportamento al fuoco. Il modello FDS (ver.4.07) considera però, un solo tipo di reazione chimica; ciò, ovviamente, costituisce una limitazione: tuttavia da un’analisi dei possibili materiali coinvolti, si è ritenuto plausibile utilizzare, quale reazione chimica di riferimento, quella del polietilene, opportunamente modificata considerando un fattore di conversione del particolato solido pari al 3.7% in massa del combustibile consumato [18]. Per le murature delimitanti i box sono state assunte le caratteristiche termo-fisiche riportate in tabella 3.

Tab. 3 Caratteristiche termo-fisiche dei materiali utilizzati nella simulazione

Materiale	Spessore δ (m)	Densità ρ (kg/m ³)	Calore specifico c_p (KJ/KgK)	Conducibilità termica k W/mK	Uso
BRICK	0,15	1600	0.84	0.69	Delimitazione box

4.2.3 Definizione del dominio di simulazione e relativa discretizzazione

La simulazione è stata effettuata su un dominio di calcolo tridimensionale.

Ai fini dell’implementazione di un problema di simulazione, è necessario definire la dimensione media della cella di discretizzazione (computational grid): a tale scopo si osservi che tale dimensione è legata ad un importante parametro indicativo della bontà della risoluzione di griglia, ovvero, il diametro caratteristico del fuoco, dato dalla seguente relazione:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad \text{dove:}$$

D^* : diametro caratteristico del fuoco;
 ρ_∞ : densità a temperatura ambiente, kg/m^3 ;
 T_∞ : temperatura ambiente, K

Q : heat release rate totale, kW;
 c_∞ : calore specifico del gas, kJ/kgK ;

Posto $T=288\text{ K}$, $\rho_\infty=1.2\text{ kg/m}^3$ e $c_\infty=1.0\text{ kJ/kgK}$ e $Q = 8300\text{ KW}$ si ha $D^* = 2.26\text{ m}$.

Si assume quindi, una dimensione media dell'elemento di discretizzazione pari a $\delta \approx 10\% D^*$.

Quanto osservato, unitamente ad una contestuale analisi di sensibilità della griglia, ha consentito di assumere una dimensione media della cella di discretizzazione pari a 20cm, salvo infittimenti locali, come giusto compromesso tra risorse computazionali ed obiettivi da raggiungere. Con tale dimensione media, il numero totale di celle costituenti il dominio della simulazione è pari a circa 700.000 celle. L'analisi di sensibilità effettuata, considera il limite oltre cui l'incertezza negli input di modello influenza l'output.

Nel caso di studio, la predetta analisi è stata effettuata sulla dimensione della cella di discretizzazione esplorando un range di dimensione compresa tra 10 e 40 cm e considerandone l'influenza sulle temperature. Per determinare l'effetto sulla soluzione, derivante dall'adozione di una griglia più fine, la stessa viene sistematicamente rifinita, finché le quantità in output non cambiano apprezzabilmente ad ogni modifica; naturalmente, ogni volta che la dimensione di cella viene dimezzata, il tempo richiesto per la simulazione aumenta notevolmente. Infine, è possibile raggiungere un opportuno compromesso fra precisione di calcolo e capacità prestazionali del calcolatore.

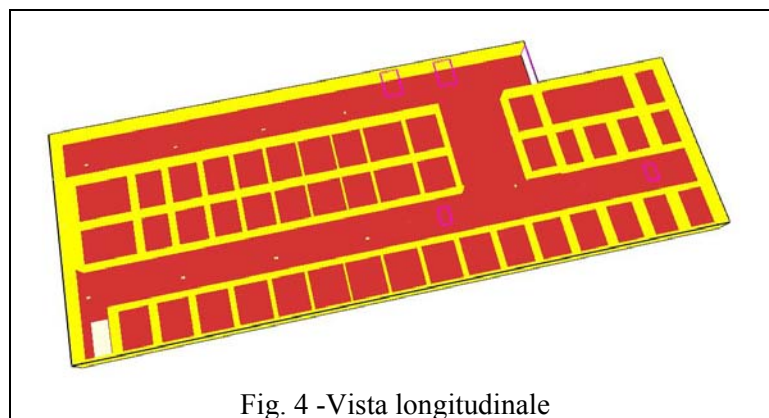


Fig. 4 -Vista longitudinale

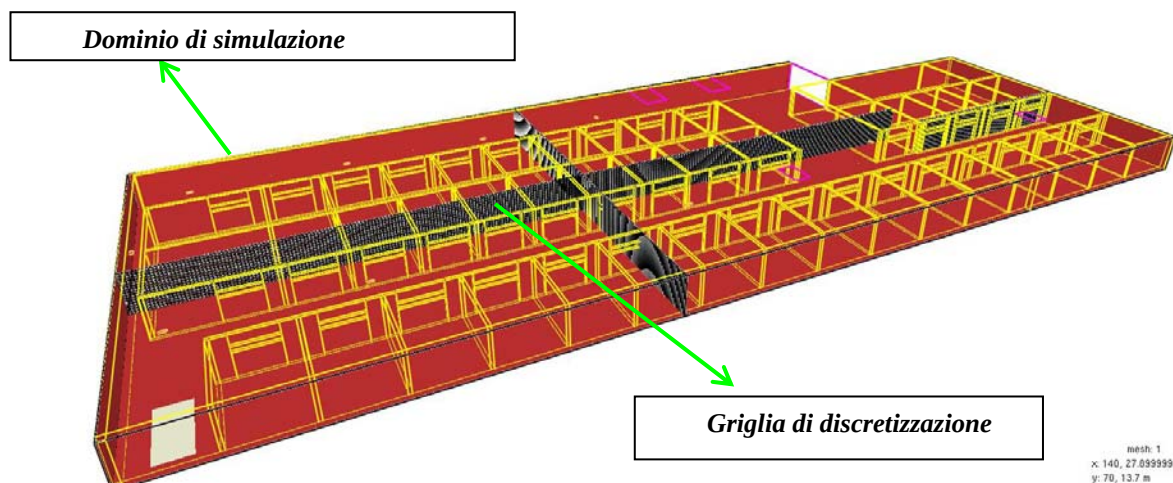


Fig. 5 – Dominio di simulazione e griglia di discretizzazione

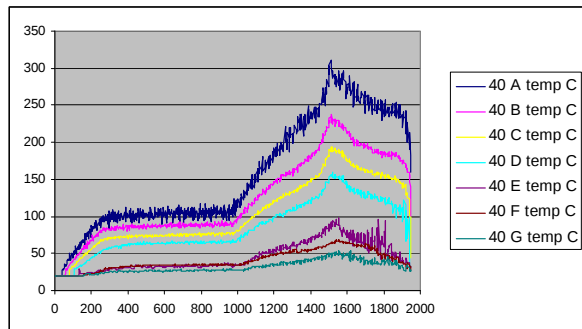
4.2.4 Run della simulazione

La simulazione, è stata effettuata considerando un intervallo temporale di evoluzione dell'incendio pari a 1950 s ed ha richiesto un tempo di elaborazione pari a 106 ore, utilizzando un computer multiprocessore Intel Corel™ 2 Quad CPU Q6600 ,2.40GHz, 2.00GB di RAM.

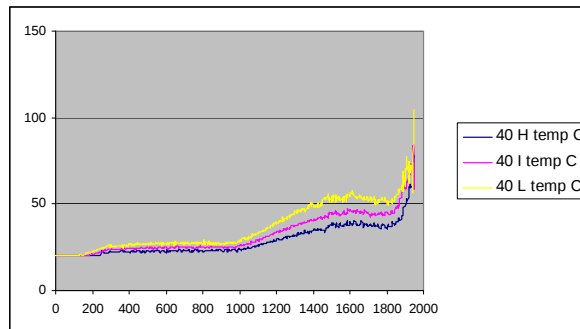
5. ANALISI QUANTITATIVA DEI RISULTATI E CONFRONTO CON I LIVELLI DI PRESTAZIONE

Di seguito si riportano, in funzione della variabile tempo, le curve delle grandezze di interesse, ovvero della temperatura, visibilità, monossido di carbonio ed ossigeno, registrate durante la simulazione ad altezza pari a 2 metri nelle posizioni A,B,C,D,E,F,G,H,I.

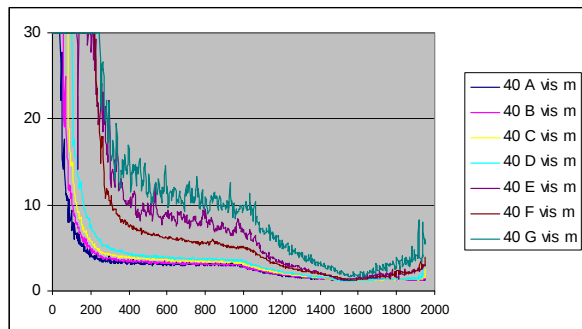
Temperature registrate in posizione A,B,C,D,E,F,G durante la simulazione



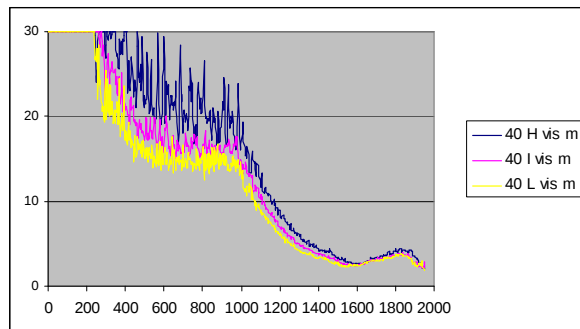
Temperature registrate in posizione H,I,L durante la simulazione



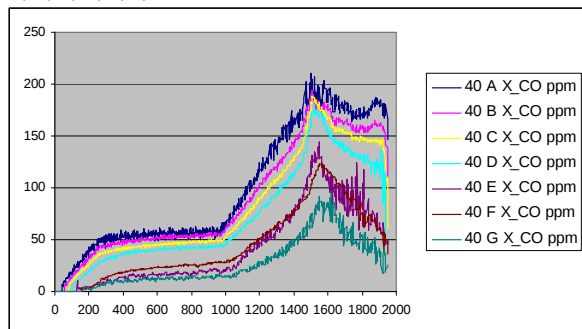
Visibilità registrate in posizione A,B,C,D,E,F,G durante la simulazione



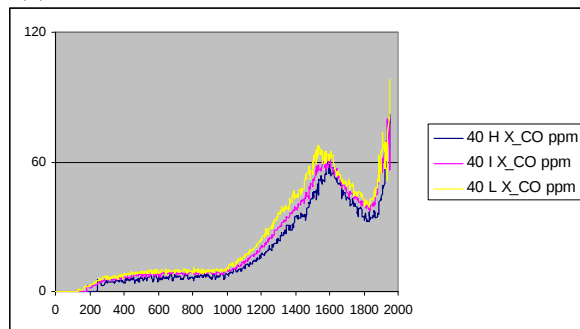
Visibilità registrate in posizione H,I,L durante la simulazione



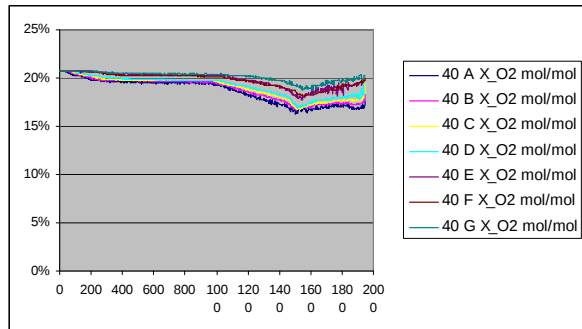
Concentrazione di CO (ppm) registrate in posizione A,B,C,D,E,F,G durante la simulazione



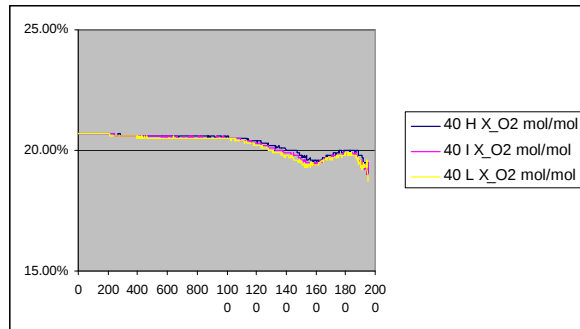
Concentrazione di CO (ppm) registrate in posizione H,I,L durante la simulazione



Concentrazione di Ossigeno registrate in posizione A,B,C,D,E,F,G durante la simulazione



Concentrazione di Ossigeno registrate in posizione H,I,L, durante la simulazione



Dai risultati così ottenuti, si evince che, le concentrazioni di ossigeno e di monossido di carbonio si mantengono, per l'intera durata della simulazione, al di sotto delle soglie di accettabilità, in corrispondenza di tutte le posizioni monitorate.

Per la visibilità e la temperatura, i limiti di accettabilità, invece, per l'intervallo di tempo assunto come riferimento, pari a 240 secondi, risultano soddisfatti nelle posizioni H, I, L, F G ed E, mentre lo stesso non può dirsi per le posizioni A,B,C,D, lungo il percorso di fuga, infatti, la visibilità raggiunge la soglia accettabile di 10m rispettivamente, all'istante 82 s, 103s, 128s ,164s, mentre la temperatura per le medesime posizioni supera la soglia di accettabilità di 50°C rispettivamente, all'istante 116 s, 132s, 169s ,235s.

Quindi, l'impianto di ventilazione meccanica, definito con un approccio empirico-prescrittivo, proposto dagli autori, garantisce il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza per quanto riguarda i valori di concentrazione dell'ossigeno e del monossido di carbonio, mentre non soddisfa completamente i livelli accettabili di sicurezza per quanto riguarda la visibilità ed i valori di temperatura.

In relazione al soddisfacimento degli obiettivi di sicurezza, l'esodo degli occupanti non risulta possibile in totale condizione di sicurezza, in riferimento al percorso di fuga, individuato dalle posizioni A – B – C – D - E – G; invece ai fini dell'intervento delle squadre di soccorso, il cui arrivo è prevedibile entro 20 minuti dalla chiamata, pur risultando possibile l'accesso al locale, riscontrando all'ingresso una temperatura minore di 50°C, l'azione di estinzione risulta ostacolata dalla visibilità fortemente ridotta dai fumi che, all'istante di 1200 secondi risulta aver invaso l'intero locale.

CASO DI STUDIO 2)

E' stata effettuata la valutazione quantitativa del livello di sicurezza antincendio, rispetto a determinate soglie prestazionali e l'analisi dei risultati ottenuti dalla simulazione dello sviluppo di un incendio in un box auto dell'autorimessa, oggetto di studio, nelle condizioni di ventilazione naturale conformi alla regola tecnica vigente e con riferimento al medesimo scenario di incendio, alle stesse caratteristiche termo-fisiche dei materiali costituenti il box, alla stessa curva di progetto e dominio fisico di simulazione.

Nella Fig. 6 si evidenziano le aperture di ventilazione naturale così come sono state dimensionate e localizzate.

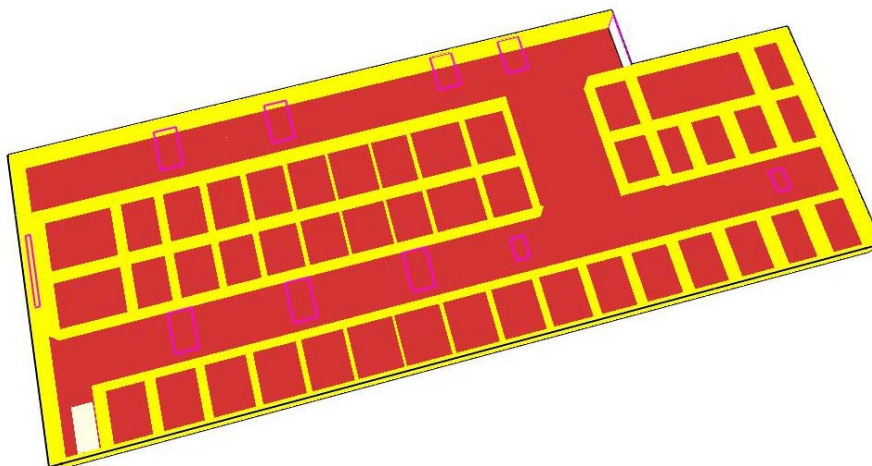
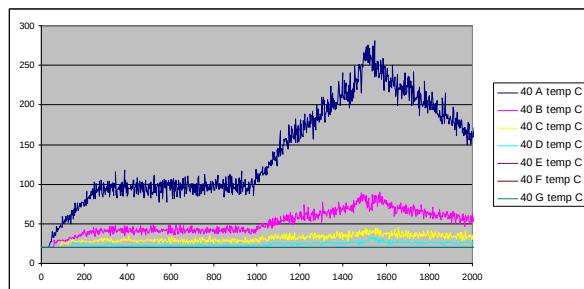


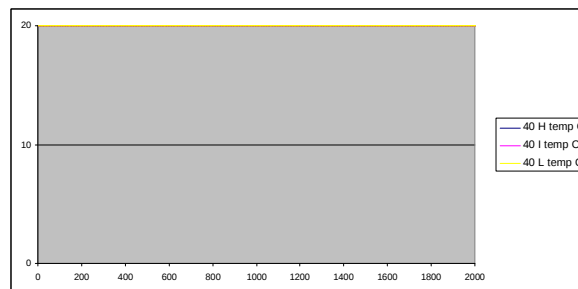
Fig. 6 – Vista longitudinale con le aperture di ventilazione naturale

Di seguito si riportano, in funzione della variabile tempo, le curve delle grandezze di interesse, ovvero della temperatura, visibilità, monossido di carbonio ed ossigeno, registrate durante la simulazione ad altezza pari a 2 metri nelle posizioni A,B,C,D,E,F,G,H,I.

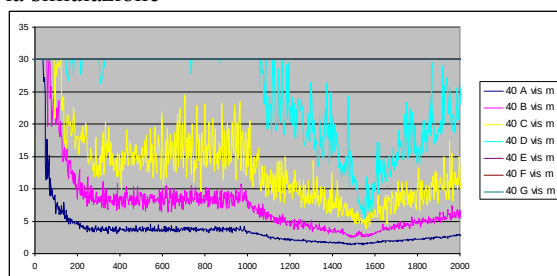
Temperature registrate in posizione A,B,C,D,E,F,G durante la simulazione



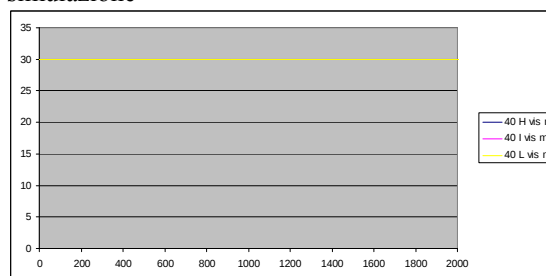
Temperature registrate in posizione H,I,L durante la simulazione



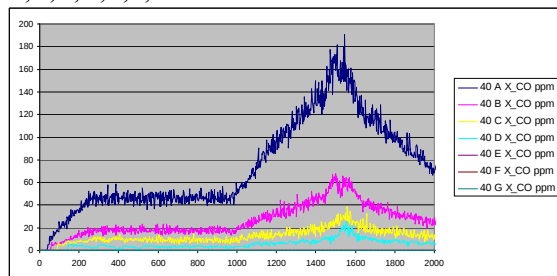
Visibilità registrate in posizione A,B,C,D,E,F,G durante la simulazione



Visibilità registrate in posizione H,I,L durante la simulazione



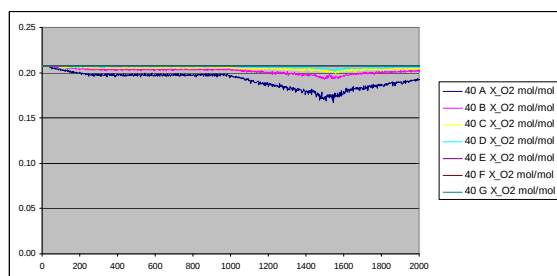
Concentrazione di CO (ppm) registrate in posizione A,B,C,D,E,F,G durante la simulazione



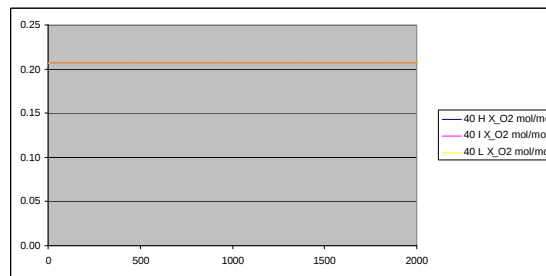
Concentrazione di CO (ppm) registrate in posizione H,I,L durante la simulazione

Valori di concentrazione inferiore all'ordine di grandezza pari ad 1 ppm

Concentrazione di Ossigeno registrate in posizione A,B,C,D,E,F,G durante la simulazione



Concentrazione di Ossigeno registrate in posizione H,I,L, durante la simulazione



Dai risultati ottenuti si evince che, nelle condizioni di un sistema di ventilazione naturale rispondente alla regola tecnica, per l'intera durata della simulazione, risultano soddisfatti i livelli di accettabilità sia per le concentrazioni di ossigeno che di monossido di carbonio; in particolare per quest'ultimo si è rilevato che le concentrazioni nelle posizioni H, I ed L sono di entità trascurabili raggiungendo valori al massimo dell'ordine di grandezza pari ad 1 ppm, e, quindi, di non apprezzabile rappresentazione grafica nella scala adottata.

Per l'intervallo di tempo assunto come riferimento, pari a 240 secondi:

- o la temperatura soddisfa i livelli di accettabilità per tutte le posizioni monitorate, ad esclusione della A situata ad una distanza pari a circa 10 m dal focolare, nella quale si raggiunge la soglia limite di 50°C all'istante $t = 95$ s.

- o la visibilità soddisfa le condizioni di sostenibilità per tutte le posizioni monitorate, ad esclusione delle posizioni A e B nelle quali assume valori pari al limite accettabile di 10m, rispettivamente, all'istante, pari a 68s e 192s,

Quindi, il sistema di ventilazione naturale, conforme alla regola tecnica antincendio, garantisce il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza per quanto riguarda i valori di concentrazione dell'ossigeno e del monossido di carbonio, mentre non soddisfa, comunque, completamente i livelli accettabili di sicurezza per quanto riguarda la visibilità ed i valori di temperatura.

Infatti pur essendo agevole l'esodo degli occupanti, in condizioni di sicurezza e l'intervento delle squadre di soccorso può avvenire senza particolari impedimenti, all'istante di 1200 secondi risulta individuabile, comunque, una zona critica, in corrispondenza delle posizioni A e B, cioè sino a distanza di circa 20 metri dal focolare.

6. CONCLUSIONI

Il presente studio ha permesso di verificare, secondo l'approccio prestazionale ed implementando il modello denominato FDS, l'entità dell'efficacia di un sistema di ventilazione meccanica, dimensionato secondo un criterio empirico – prescrittivo proposto dagli autori, valutandone quantitativamente, rispetto a determinate soglie prestazionali e per un intervallo di tempo assunto quale riferimento, il livello di sicurezza antincendio e di effettuarne il confronto con le condizioni di sicurezza antincendio definite da un sistema di ventilazione naturale conforme alla regola tecnica vigente.

Dall'analisi dei risultati delle simulazioni effettuate, considerando lo sviluppo di incendio in un box di una autorimessa ubicata al primo piano interrato e con capacità di parcheggio inferiore a 125 autoveicoli (tipologia di autorimessa particolarmente diffusa nella pratica ordinaria) è stato possibile constatare la parziale efficacia del sistema di ventilazione meccanica, in quanto i parametri di prestazione "Concentrazione di Ossigeno" e "Concentrazione di Monossido" risultano soddisfatti, mentre i parametri di prestazione "Temperatura" e "Visibilità" non risultano soddisfatti per il solo tratto A – B – C - D di uno dei due percorsi di esodo disponibili.

Il risultato ottenuto, ai fini del soddisfacimento degli obiettivi di sicurezza, suggerisce, quindi, l'opportunità di revisionare il dimensionamento dell'impianto di ventilazione meccanica, così come proposto ai fini della compensazione del rischio aggiuntivo, conseguente al mancato rispetto della regola tecnica.

RIFERIMENTI

- [1] G. Mazzini, G. Parisi, G. Monopoli, A. Paola, G. Longobardo, M. Macaluso, P. Masini, M. La Scala, U.Ayr, M. Romano, S. Bruno, F. Rifino, M. Castore, L. Pappalettera, R.Pavia. "Validazione di un modello fluidodinamico di simulazione incendi: sperimentazione "full scale" effettuata nella Metropolitana di Roma". Atti del Convegno Scientifico Nazionale "Sicurezza Sistemi Complessi", Bari, 16-17-18 ottobre 2007.
- [2] K. McGrattan.: "Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide," National Institute of Standards and Technology, Special Publication 1018, 2004.
- [3] McGrattan, K. B., Rehm, R. G., Baum, H. R.: "Fire Driven Flows in Enclosures," Journal of Computational Physics, Volume 110, No. 2, 1994.
- [4] H.R. Baum, K.B. McGrattan, and R.G. Rehm: "Three Dimensional Simulations of Fire Plume Dynamics" Journal of the Heat Transfer Society of Japan, 35(139):45-52, 1997.
- [5] K.B. McGrattan, H.R. Baum, and R.G. Rehm: "Large Eddy Simulations of Smoke Movement"- Fire Safety Journal, 30:161-178, 1998.
- [6] Chung T.J., "Computational Fluid Dynamics", Cambridge University Press, 2002.
- [7] Bradshaw P., "Turbulence", Springer-Verlag, 1976
- [8] P.J. DiNenno, editor: "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering". National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition, 2002.

- [9] R. Siegel and J. R. Howell: "Thermal Radiation Heat Transfer" Taylor & Francis, New York, 4th edition, 2002.
- [10] Purser; "Toxicity Assessment of Combustion Products", The SFPE Handbook chapter 2-8
- [11] Drysdale D., An Introduction to Fire Dynamics - Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England, 1998.
- [12] British Standards - PD 7974-6:2004 – BSI "The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings - Part 6: Human factors: Life safety strategies - Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6)
- [13] P. Masini, U. Ayr, M. Romano, F. Decandia, L. Pappaletta: "Applicazione del modellatore di incendi cfast con una curva teorica del tasso di rilascio termico", atti del Convegno Nazionale Valutazione e Gestione del Rischio, Pisa, 19-21 ottobre 2004.
- [14] U. Ayr, Decandia F., P. Masini, L. Pappaletta, M. Romano: "Validazione sperimentale di un modellatore di incendi", atti del Convegno Nazionale Sicurezza Sistemi Complessi, Bari, 16-17 ottobre 2003.
- [15] McGrattan K B, Forney G P.. "Fire Dynamics Simulator (Version 4) - User Guide." NIST Special Publication 1019, National Institute of Technology and Standards, 2004.
- [16] Draft Final Report "Demonstration of real fire tests in car parks and high building ", CEC Agreement 7215 - PP/025, March 2002
- [17] Schleich, J. B., Cajot, L. G., Pierre, M. and Brasseur, M. (1999) "Development of Design Rules for Steel Structures Subjected to Natural Fires in Closed Car Parks." European Commission, Luxembourg.
- [18] X.G. Zhang, Y.C. Guo, C.K. Chan, W.Y. Lin "Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park", Elsevier 2006