

SPERIMENTAZIONI DI INCENDI SU SCALA REALE IN UN EDIFICIO RESIDENZIALE ED ANALISI DELLA PROPAGAZIONE DEI FUMI EXPERIMENTAL TESTS ON REAL FIRES IN A RESIDENTIAL BUILDING AND SMOKE PROPAGATION ANALISYS

A. Ficarella*, R. Lala*, A. Perago*, D. Laforgia*

*Università degli Studi di Lecce - Dip. Ingegneria Innovazione – Via per Arnesano – 73100 Lecce (Italy) – antonio.ficarella@unile.it

S. Buffo°

°Dipartimento VV.F. Soccorso Pubblico e Difesa Civile – Via Tippiuti 50 – Bari

SOMMARIO

Sono state condotte nell'autunno del 2001 una serie di sperimentazioni, coordinate e dirette dal Comando Provinciale dei VV.F. di Bari, per analizzare lo sviluppo di incendi controllati all'interno di un immobile destinato ad uso ufficio, bruciando del poliuretano per riprodurre gli effetti della combustione di elementi di arredo imbottiti. Si è, inoltre, provveduto a realizzare differenti condizioni di ventilazione ed a monitorare l'evoluzione dei fumi e della temperatura in diversi punti dell'edificio.

La strumentazione utilizzata, posta nelle vicinanze dell'incendio e lungo il percorso dei fumi, ha consentito di raccogliere dati in diverse condizioni di ventilazione del locale "focolare" e delle aree al contorno su temperatura, composizione, opacità e velocità dei fumi; in particolare, per l'analisi dei fumi, sono state misurate le concentrazioni di O₂, CO e CO₂.

È stata, infine, realizzata una simulazione numerica, tramite l'utilizzo di un modello a zone, imponendo le condizioni di uno degli scenari realizzati sperimentalmente. I risultati ottenuti, confrontati con i dati raccolti, hanno denotato un buon accordo tra gli andamenti di temperatura e concentrazione dei gas forniti sia dalla simulazione sia dalla sperimentazione.

ABSTRACT

A set of experimentations, supervised by Comando Provinciale dei VV.F. di Bari, has been made to analyse the development of controlled fires in office, burning polyurethane to reproduce padded furniture combustion effects. Different ventilation conditions have been carried out and smoke flow evolution and temperature trends have been monitored.

The instrumentation, placed near the fire and along the smoke way, has collected temperature, composition and smoke opacity data; particularly, concentrations of O₂, CO and CO₂ have been measured for smoke analysis.

Finally, the collected data have been compared with the results of a zones model simulation, applied on an analyzed situation. It has been found a good agreement between zone model simulation results and experimental data.

1. INTRODUZIONE

Il problema principale nel caso di strutture civili aggredite da incendi è il rischio, sicuramente più elevato rispetto ad altre tipologie di incendio, di perdite di vite umane. Tale rischio maggiore è legato al fatto che, nella stragrande maggioranza dei casi, gli occupanti di strutture civili (quali abitazioni, uffici, ecc...) mancano delle più elementari nozioni di prevenzione e protezione incendi, contribuendo a rendere ancora meno agevole il compito dei soccorritori.

Vi è da sottolineare, inoltre, che il pericolo di vita è dovuto in misura maggiore alla propagazione dei fumi rispetto al raggiungimento di alte temperature. Notevole è, infatti, la loro tossicità a causa, prioritariamente, della presenza di monossido di carbonio in quantità letali. Riuscire, inoltre, ad individuare tempestivamente le zone della struttura maggiormente interessate dalla situazione di pericolo è di fondamentale importanza per l'efficacia dell'opera dei soccorritori, per la loro stessa sicurezza e per le indicazioni necessarie alla previsione di idonee misure passive e attive. Non a caso, infatti, l'ingegneria antincendio presta particolare attenzione alla progettazione delle vie di esodo, ai tempi ed ai criteri di evacuazione dei locali interessati dall'incendio [1], tenendo presenti tutte le variabili che possono costituire una strategia complessa e a tutto campo in grado di garantire, in caso di incendio, la sicurezza degli occupanti, dei beni mobili e di quelli immobili [2].

Notevole importanza riveste, pertanto, la campagna di prove illustrata nel presente lavoro, considerata anche la scarsità di esperimenti di questo tipo riscontrabile in letteratura.

Si è proceduto appiccando una serie di incendi in un edificio adibito ad usi civili, con lo scopo di analizzare la propagazione dei fumi in relazione a diverse condizioni di ventilazione [3, 4]; un ulteriore obiettivo dell'attività sperimentale è stato quello di raccogliere dati riguardanti incendi reali, in condizioni controllate, per la validazione di modelli matematici in grado di prevedere l'andamento degli incendi e la propagazione dei fumi [5].

Le sperimentazioni di seguito descritte hanno consentito una migliore comprensione delle problematiche inerenti la sicurezza dell'evacuazione delle persone coinvolte nell'incendio e degli operatori impegnati nelle fasi di soccorso e spegnimento, con particolare riferimento alla percorribilità delle vie di fuga [6]. L'analisi dei dati, raccolti in diverse condizioni sperimentali, può fornire utili indicazioni per l'attività di progettazione architettonica e impiantistica.

I risultati raccolti sul campo saranno confrontati con i risultati ottenuti da un modello numerico appositamente sviluppato ed implementato tramite un codice di calcolo fluidodinamico [7, 8] per prevedere l'evoluzione dei flussi dei fumi e l'andamento della temperatura a seguito di un incendio.

2. CAMPAGNA DI PROVE SPERIMENTALI

Le sperimentazioni sono state condotte in un immobile (completato a meno delle opere di rifinitura), con una superficie in pianta di 270 m² e alto tredici piani (Figura 1).

Le sperimentazioni sono state coordinate e dirette dall'ing. Salvatore Buffo, già comandante provinciale dei VV.F. di Bari. I VV.F. hanno predisposto i locali per l'incendio, fornito le attrezzature necessarie, curato la ripresa video e garantito il supporto logistico per lo svolgimento delle prove in sicurezza.

Alle sperimentazioni ha partecipato anche l'Istituto di Fisica Tecnica del Politecnico di Bari, in merito alla relazione e valutazione delle temperature raggiunte, ed il Centro Studi ed Esperienze del C.N.VV.F.

Il piano prescelto è l'ottavo; gli incendi sono stati provocati nella stanza tratteggiata in figura 2 e denominata "locale interessato da incendio".

È stato bruciato poliuretano in blocchi di forma cubica, per simulare la combustione di un elemento di arredo imbottito [9]. Trattasi, in particolare, di poliuretano espanso di densità pari a 32 kg/m³, ottenuto col procedimento "one shot" in continuo ed impiegato nell'industria dell'arredamento per imbottiture di classe IIM, il cui potere calorifico inferiore è pari a 26 MJ/kg.

Sono state condotte numerose prove, riportate in tabella 1, differenti tra loro per la quantità del materiale bruciato e per la variazione, nel tempo, delle condizioni di ventilazione dei locali interessati dall'incendio, ottenuta modificando il grado di apertura delle finestre.



Figura 1. Edificio sede della sperimentazione

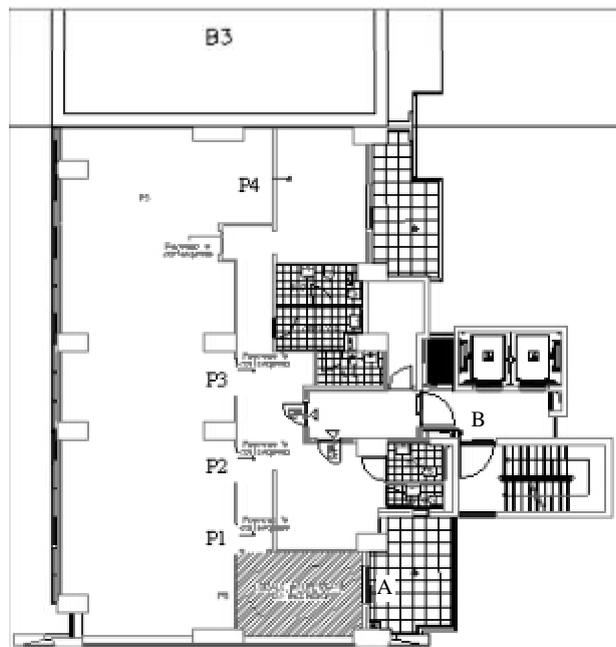


Figura 2. Pianta del piano interessato dall'incendio

Per quanto concerne l'aerazione, è possibile individuarne tre diverse tipologie:

- aerazione al focolare (A), in corrispondenza del locale interessato dall'incendio si trova una finestra a due battenti (2 x 0,5 m) aperta dopo un minuto dal raggiungimento della temperatura di 180 °C (temperatura di rottura del vetro comune). È prevista anche l'apertura parziale (pari al 50% della superficie o totale);
- vano scala di tipo aperto, porta di collegamento vano scala-piano aperta (B);
- aerazione, apertura di superficie pari a 1 m² posta alla sommità del vano scala.

Alle suddette tipologie di aerazione è da aggiungersi un'altra legata alla chiusura della porta tagliafuoco (C) che separa l'appartamento dal vano scala.

La propagazione dei fumi è stata monitorata nel corridoio del piano e nelle immediate vicinanze del locale interessato dall'incendio, rilevando temperatura e composizione dei fumi (concentrazioni di O₂, CO e CO₂). Nel vano scala e nei piani superiori sono state misurate temperature e concentrazioni di CO.

Al termine dell'incendio sono stati prelevati campioni di materiale residuo, sottoposti ad analisi chimica e microscopica.

Nell'elaborazione dei dati, infine, è stata posta particolare attenzione all'analisi delle correlazioni temporali e spaziali tra tutti i parametri misurati.

Tabella 1. Elenco prove

CODICE	TIPOLOGIA PROVE	PESO MATERIALE COMBUSTO
1	Prova con 1/2 aerazione al focolare e vano scala tipo protetto	20,04 kg
2	Prova con 1/2 aerazione al focolare e scala tipo aperto senza aerazione in sommità di 1 mq	21,74 kg
3	Prova con 1/2 aerazione al focolare e scala tipo aperto con aerazione in sommità di 1 mq	19,89 kg
4	Prova con 2/2 aerazione al focolare e scala tipo aperto senza aerazione in sommità 1 mq	20,31 kg
5	Prova con 2/2 aerazione al focolare e scala tipo aperto con aerazione in sommità di 1 mq	20,68 kg
6	Prova con 1/2 aerazione al focolare e scala tipo aperto con aerazione in sommità di 1 mq	20,73 kg
7	Prova con 2/2 aerazione al focolare e scala tipo aperto con aerazione in sommità di 1 mq	20,90 kg
8	Prova senza aerazione al focolare e scala tipo aperto con aerazione in sommità di 1 mq	20,46 kg
9	Prova senza aerazione al focolare e scala tipo aperto con aerazione in sommità di 1 mq	20,46 kg
10	Prova senza aerazione al focolare e scala tipo aperto senza aerazione in sommità di 1 mq	19,00 kg
11	Prova senza aerazione al focolare e scala tipo aperto senza aerazione in sommità di 1 mq	19,00 kg
12	Prova con 2/2 aerazione dopo 4 minuti e 30 secondi, vano scala di tipo aperto, aerazione in sommità chiusa e con divano	32,00 kg
13	Prova con scala protetta e aerazione 2/2 al focolare	20,00 kg

3. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La sede delle prove prevede, oltre alla *zona calda* luogo di sviluppo e propagazione dell'incendio, una *zona fredda* adibita alle postazioni degli operatori e all'ubicazione della strumentazione e dei relativi apparecchi di controllo (Figura 2). Le postazioni, i relativi strumenti, la quota di posizionamento e la tipologia di misura sono elencati in tabella 2.

Gli apparecchi TESTO modello 325-1 sono analizzatori di gas; effettuano misure di temperatura e concentrazione di O₂, CO₂ e CO sui fumi che investono il sensore posizionato in punta. Affinché il sensore sia completamente immerso nel flusso di gas, lo strumento è stato collocato nel corridoio interessato dal passaggio dei fumi attraverso un foro sulla parete divisoria in cartongesso. In particolare, tale strumento si è rivelato estremamente sensibile alle brusche variazioni di temperatura ed in grado di seguirle rapidamente. Tale caratteristica si rivela importante soprattutto nelle zone prossime all'incendio in cui le temperature raggiungono valori elevati in breve tempo. Le caratteristiche dello strumento e della memorizzazione dei dati hanno imposto un limite inferiore alla frequenza di acquisizione; si è scelto, quindi, di acquisire una misura ogni 60 s.

Tabella 2. Elenco Postazioni

Postazioni	Strumenti	Quota	Misura
Postazione P1 (Figura 3)	TESTO	2,1 m	Concentrazione di CO, CO ₂ , O ₂ e Temperatura
	Termocoppia	1,5 m	Temperatura
	Prelievo particolato	2,1 m	Dimensioni granulometriche
Postazione P2 (Figura 4)	AVL	2,1 m	Concentrazione di CO, CO ₂ , O ₂
	Termocoppia	1,5 m	Temperatura
	Termocoppia	2,1 m	Temperatura
	Prelievo particolato	2,1 m	Dimensioni granulometriche
Postazione P3 (Figura 5)	TESTO	1,5 m	Concentrazione di CO, CO ₂ , O ₂ e Temperatura
Postazione P4 (Figura 6)	AVL	1,5 m	Concentrazione di CO, CO ₂ , O ₂
	Termocoppia	1,5 m	Temperatura



Figura 3. Postazione P1



Figura 4. Postazione P2

Gli analizzatori AVL modello DiCOM 4000 rilevano sia le concentrazioni di O₂, CO₂ e CO presenti nei fumi, sia la loro opacità. Anche in questo caso sono state forate le pareti in cartongesso per collocare le sonde direttamente nel corridoio interessato al passaggio dei fumi.

Le caratteristiche operative dello strumento hanno consentito l'acquisizione dei dati ogni 30 s. È stato osservato un buon accordo tra gli andamenti dei valori delle concentrazioni di gas rilevati dagli strumenti AVL, utilizzati nella configurazione di analizzatori di gas, e i dati misurati con gli strumenti TESTO.

Per le misure di temperatura sono state utilizzate termocoppie per applicazioni industriali che consentono la misura di temperature superiori a 1000 °C. Le estremità delle termocoppie attraversano le pareti in cartongesso, trovandosi a diretto contatto con i fumi dell'incendio che si propagano nel corridoio. Ciascuna termocoppia è collegata, mediante cavo compensato, ad un controller ASCON tipo C1 Line, da cui è possibile leggere in tempo reale il valore della temperatura, registrato ogni 30 s. Si deve tenere presente che l'inerzia termica di tali termocoppie, dotate di guaina di protezione, è significativa e causa apprezzabili ritardi nella lettura della temperatura durante le brusche variazioni della stessa.



Figura 5. Postazione P3



Figura 6. Postazione P4

A tali postazioni di misura si aggiungono, sempre all'interno della zona fredda, le seguenti:

- videoregistrazione e coordinamento delle operazioni e delle manovre eseguite dal nucleo operativo dei VV.F. nella zona dell'incendio;
- controllo dinamico del peso del materiale durante la combustione.

Il controllo del peso consente di conoscere la velocità della combustione. Il contenitore con il materiale da bruciare è collegato ad una bilancia che misura, in tempo reale, la variazione di peso dovuta allo sviluppo della combustione (Figura 7); da tale valutazione è stato possibile estrapolare la velocità e l'energia di combustione. Particolari precauzioni sono state adottate affinché la temperatura in gioco non alterasse la misurazione del peso.

Un pirometro, posizionato nello stesso gruppo di strumenti, controlla istante per istante la temperatura raggiunta dalla superficie del vetro al borosilicato utilizzato, per la sua notevole resistenza termica, come elemento separatore tra la stanza dell'incendio e la zona fredda, consentendo di filmare e fotografare l'intera combustione (Figura 8). Il limite massimo della temperatura sopportabile dal vetro comune è pari a 180°C; dopo un minuto dal raggiungimento di tale limite, si scopre l'apertura presente nella stanza dell'incendio per simulare la rottura dei vetri delle finestre.

Nella zona calda, infine, oltre alle altre postazioni delle videocamere e dei relativi operatori, sono state collocate sulle pareti scale graduate per la determinazione dell'altezza libera raggiunta dai fumi e della loro velocità orizzontale.

Una serie di termocoppie è stata posizionata all'interno dell'appartamento, del vano scala e dei piani superiori. Tutte le termocoppie sono gestite da un'unica centralina localizzata al piano nono, il cui

coordinamento è stato affidato al prof. Ing. Ettore Cirillo ed al prof. Ing. Ubaldo Ayr dell'Istituto di Fisica Tecnica del Politecnico di Bari.

4. ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

È riportato, di seguito, il confronto tra le sperimentazioni 3 e 5 presentate in tabella 1; trattasi di due prove caratterizzate da condizioni al contorno simili e che differiscono solo per l'apertura del serramento presente nel vano sede dell'incendio.



Figura 7. Postazione VV.FF. rilievo peso

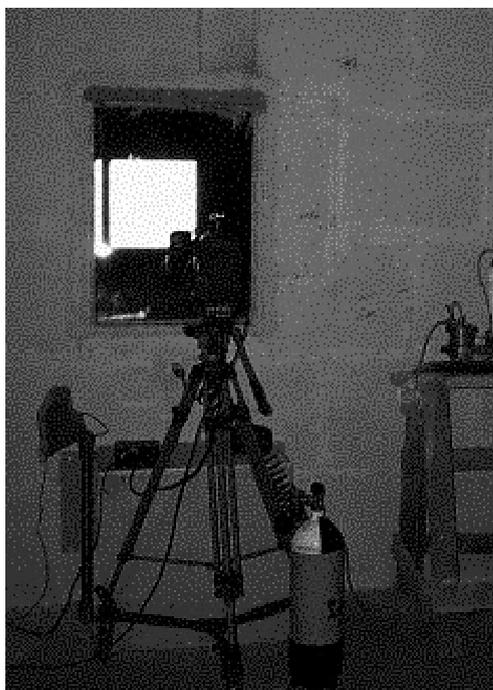


Figura 8. Postazione VV.FF. videoregistrazione

Il serramento in questione ha una superficie di 1 m^2 e presenta due zone separate, entrambe della dimensione di $0,5 \text{ m}^2$, la cui rottura è ipotizzata per simulare quella del vetro che, in un incendio reale, avviene ad un minuto dal raggiungimento della temperatura di 180°C .

Le vie di sfogo dei fumi sono: la finestra del vano focolare (A) indicata sulla planimetria di figura 2 e la porta di accesso al vano scala (B); il vano scala presenta, inoltre, un'apertura di 1 m^2 in sommità, che provoca il tipico effetto camino.

Il materiale bruciato è identico per entrambe le prove, sia in termini qualitativi che quantitativi. Le due simulazioni in esame si differenziano, come descritto in precedenza, solo per la diversa apertura del serramento nella stanza incendio (A); in particolare, la prova 3 è caratterizzata da un'apertura del 50% di tale serramento, mentre la prova 5 è caratterizzata da un'apertura totale.

I dati sperimentali sulla variazione di peso del materiale durante la combustione, sulla concentrazione di CO_2 , CO e O_2 e sulla temperatura raccolti durante le prove sono mostrati nei grafici seguenti.

La prova 3 presenta una combustione completa del materiale (Figura 9): la velocità di combustione è maggiore di quella della prova 5, ben visibile dopo 540 secondi. La prova 5 è invece caratterizzata da un elevato residuo di materiale non gassificato.

A causa della migliore combustione del materiale impiegato, le temperature in ognuna delle postazioni di rilievo considerate sono risultate maggiori nel caso 3 rispetto al caso 5 (Figura 10). In particolare, durante la prova 3 si raggiunge una temperatura massima superiore a 250°C , più alta dei 200°C rilevati per la prova 5.

Tale differenza risulta minore, dell'ordine di 10°C , dall'analisi dei dati rilevati dalla termocoppia nella postazione P2 (Figura 2). La prova 3 ha, inoltre, un andamento più graduale della variazione di temperatura rispetto alla prova 5, in cui l'apertura del serramento è totale. Quest'ultima condizione al contorno evidentemente rappresenta un'ulteriore via d'uscita dei fumi, con conseguente raffreddamento immediato della stanza e, quindi, una riduzione della temperatura e dell'intensità del fenomeno di combustione.

Le differenze tra le due prove delle caratteristiche dei fumi all'interno del corridoio sono raccolte nei grafici di figura 11 (concentrazione in volume di ossigeno), figura 12 (concentrazione in volume di anidride carbonica) e figura 13 (concentrazione in volume di monossido di carbonio).

Ognuno dei grafici suddetti rappresenta i dati prelevati nella postazione P1 (Figura 1 e Tabella 1), nelle immediate vicinanze della stanza destinata all'incendio, e nella postazione P3, in corrispondenza dell'accesso al vano scala.

Dall'analisi delle percentuali di ossigeno nei fumi, si vede che la prova 3 è caratterizzata da una combustione più intensa, come ipotizzabile dal raggiungimento di valori minimi di concentrazione di ossigeno inferiori al 15% in corrispondenza della postazione P1 (Figura 11), concentrazioni molto al di sotto di quelle compatibili con la sopravvivenza umana. In corrispondenza dei valori minimi dell'ossigeno si rilevano, per contro, i valori massimi delle concentrazioni di anidride carbonica e monossido di carbonio.

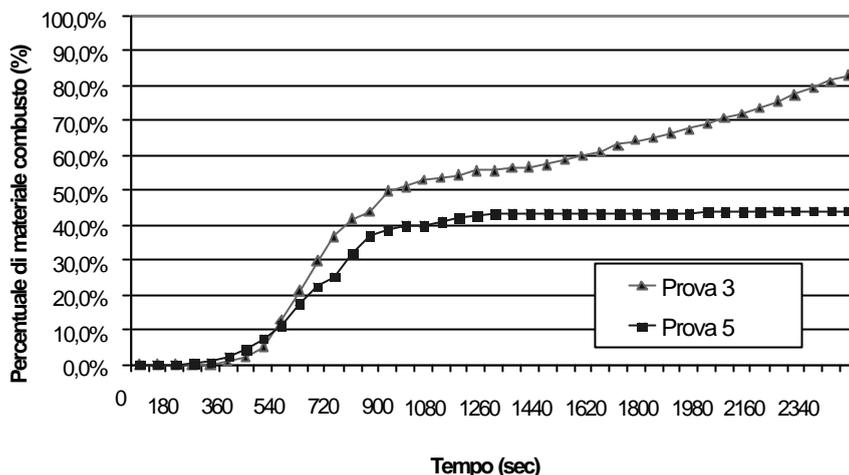


Figura 9. Andamento della percentuale di materiale combusto

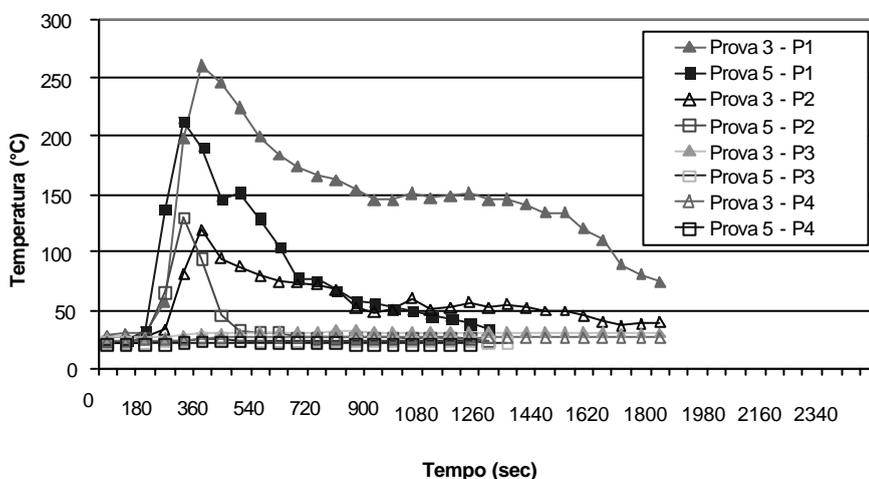


Figura 10. Andamento della temperatura

L'anidride carbonica, in particolare, raggiunge valori che rimangono comunque elevati durante la prova 3 anche in corrispondenza della postazione P3 (Figura 12), al contrario di ciò che accade durante la prova 5 caratterizzata da concentrazioni non misurabili di anidride carbonica. Valori così bassi consentono l'eventuale evacuazione delle persone e/o gli interventi di soccorso in condizioni di sicurezza.

Gli andamenti delle concentrazioni di monossido di carbonio sono differenti tra le due prove (Figura 13), anche se in misura minore rispetto alle altre grandezze precedentemente analizzate.

Il confronto tra i dati delle due prove in oggetto evidenzia la significativa influenza delle condizioni di ventilazione (differente apertura della finestra all'interno della stanza dell'incendio) sia sull'evoluzione termica del fenomeno, sia sulle caratteristiche dei fumi. Tali valutazioni sono di fondamentale importanza per la sicurezza, durante l'evacuazione, delle persone presenti sul luogo dell'incendio e per la sicurezza dell'intervento dei soccorritori.

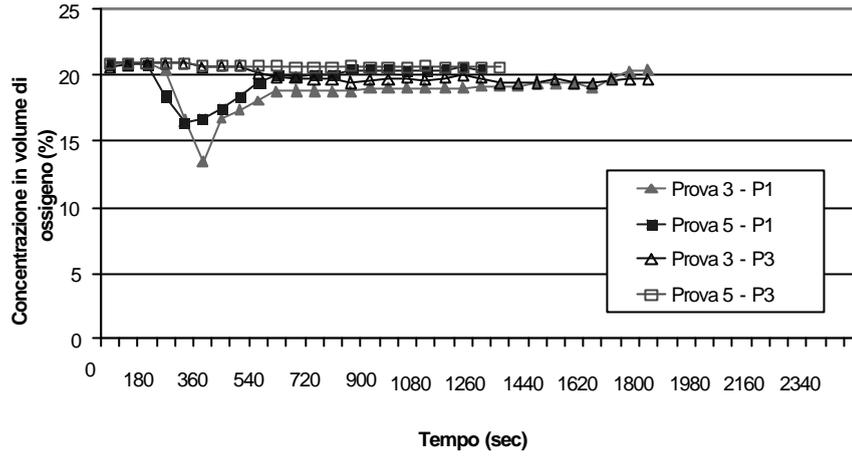


Figura 11. Andamento della concentrazione in volume di ossigeno

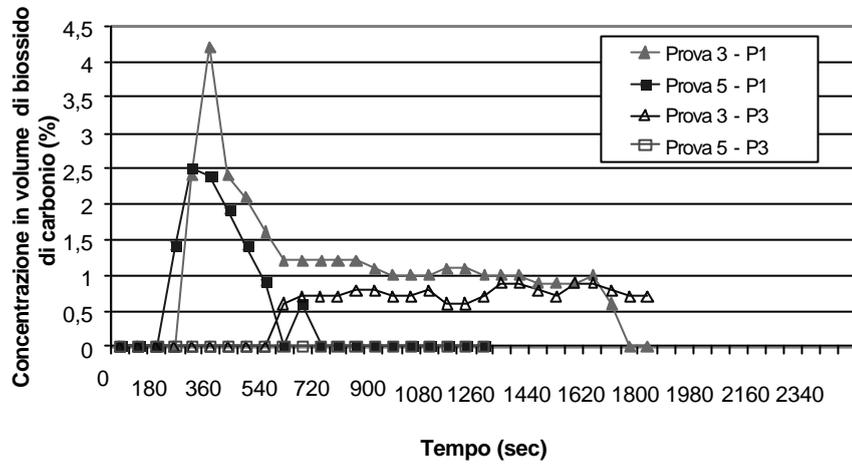


Figura 12. Andamento della concentrazione in volume di anidride carbonica

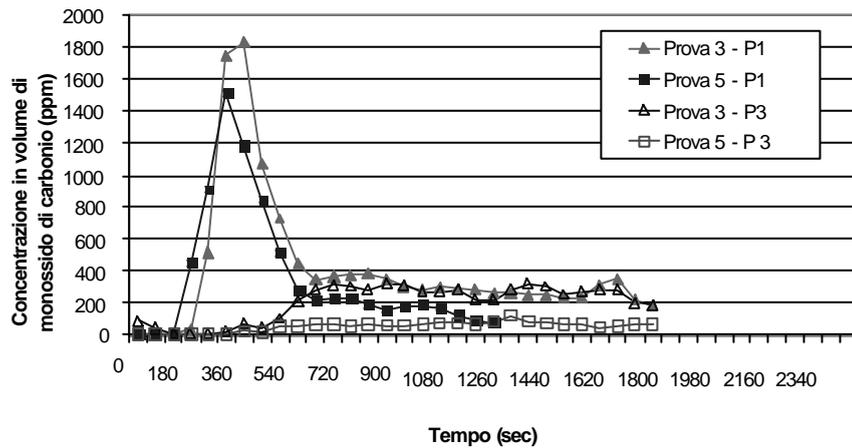


Figura 13. Andamento della concentrazione in volume del monossido di carbonio

5. IL MODELLO DETERMINISTICO A ZONE

Il moto dei fluidi, sia esso laminare o turbolento, è descritto dalle equazioni di Navier-Stokes. Circoscritto il volume di controllo entro cui le proprietà del fluido rimangono invariate, si considerano due tipi di forze:

- 1) le forze di massa (peso);
- 2) le forze di superficie (pressione ed attrito).

Lo studio della fluidodinamica dell'incendio prevede il calcolo della quantità di moto delle particelle che costituiscono i prodotti della combustione (gas caldi) e la loro distribuzione nello spazio dalle equazioni di Navier-Stokes. Tali equazioni mettono in relazione la velocità e la pressione del fluido conoscendone densità e viscosità [10]. Le equazioni di Navier-Stokes e le equazioni di continuità (derivanti dal principio di conservazione della massa) costituiscono un sistema di quattro equazioni differenziali da cui ricavare le tre componenti della velocità e il valore della pressione.

Il modello a zone utilizzato nel presente lavoro è stato realizzato con il software commerciale C-FAST. Il sistema di equazioni differenziali risolto è riportato in tabella 3.

Tabella 3. Equazioni differenziali del modello deterministico

Equazione differenziale della massa nel piano i-esimo	$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_i$
Equazione differenziale della pressione	$\frac{dP}{dt} = \frac{\mathbf{g}-1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_U)$
Equazione differenziale della energia nel piano i-esimo	$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\mathbf{g}} (\dot{h}_i + V_i \frac{dP}{dT})$
Equazione differenziale del volume nel piano i-esimo	$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{\mathbf{g}^p} ((\mathbf{g}-1)\dot{h}_i - V_i \frac{dP}{dT})$
Equazione differenziale del densità nel piano i-esimo	$\frac{d\rho_i}{dt} = -\frac{1}{c_p T_i V_i} ((\dot{h}_i - c_p \dot{m}_i T_i) - \frac{V_i}{\mathbf{g}-1} \frac{dP}{dT})$
Equazione differenziale del temperatura nel piano i-esimo	$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_i V_i} ((\dot{h}_i - c_p \dot{m}_i T_i) + V_i \frac{dP}{dT})$

Nel modello a zone si ipotizza un comportamento dinamico proprio degli incendi confinati. In ogni compartimento si distinguono, infatti, tre zone: uno strato caldo superiore, uno strato freddo inferiore ed una zona, detta *plume*, in cui si ha la combustione e il risucchio dell'aria dallo strato inferiore allo strato caldo superiore (Figura 14).

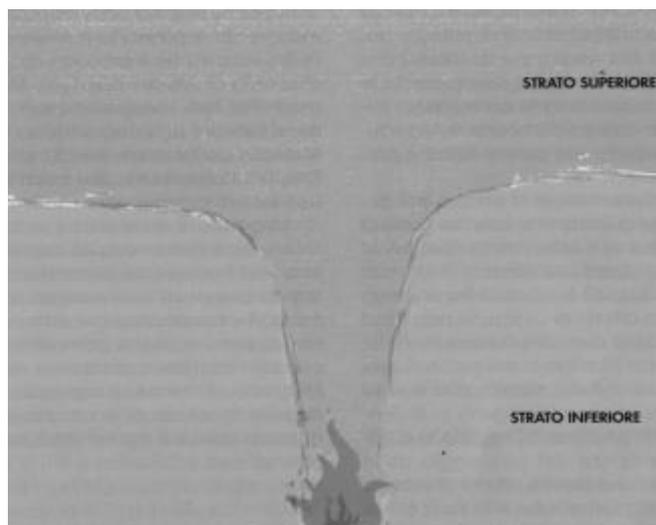


Figura 14. Modello a zone del compartimento

Le ipotesi di base del modello a zone esaminato sono le seguenti:

- ogni stanza è divisa in due volumi V_U (strato superiore) e V_L (strato inferiore) con caratteristiche termodinamiche uniformi e stesse concentrazioni di fumi e specie chimiche;
- il volume di ogni stanza scambia entalpia e massa con gli altri volumi secondo leggi di conservazione dell'energia e della massa di derivazione semiempirica;
- le reazioni di combustione avvengono a velocità infinita;
- il calcolo dell'irraggiamento e della conduzione termica tra zone e pareti è eseguito con formule approssimate.

La grandezza che caratterizza il comportamento della combustione in caso di incendio controllato in ventilazione è il rapporto di equivalenza Φ [11]:

$$\Phi = \frac{S m A}{m_e} \quad (1)$$

dove S è il rapporto stechiometrico aria-combustibile, m la perdita in massa del combustibile per unità di area, A è la sezione interessata dall'incendio, m_e è la portata di aria che alimenta la combustione.

Dalla (1) si nota che minore è la quantità di aria che partecipa alla combustione, maggiore è Φ , rapporto tra la concentrazione di combustibile effettiva e concentrazione stechiometrica. L'equazione di correlazione è:

$$X = X_0 [1 + \alpha / \exp(\Phi/\beta)^\zeta] \quad (2)$$

dove X è la grandezza che si vuole calcolare; X_0 è la stessa grandezza misurata in caso di incendi non confinati, α , β , ζ sono coefficienti di correlazione caratteristici della struttura chimica del combustibile.

6. CONFRONTO TRA DATI SPERIMENTALI E RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

È stata realizzata una simulazione con le impostazioni del caso 5 e i risultati ottenuti sono stati confrontati con i dati raccolti sperimentalmente.

L'approccio iniziale del modello a zone prevede l'individuazione geometrica degli ambienti interessati dall'incendio; in particolare, l'appartamento è stato suddiviso in tre compartimenti:

- la stanza dell'incendio, per la quale si è simulata l'apertura di una finestra al raggiungimento della temperatura di 180 °C (compartimento 1);
- il disimpegno, luogo di posizionamento delle sonde per la misurazione sperimentale (compartimento 2);
- la via di esodo che conduce al vano scala (compartimento 3).

Si è quindi selezionato il materiale combustibile, ovvero 20.68 kg di poliuretano, dalla banca dati del software.

La figura 15 mostra il confronto dell'andamento della temperatura in corrispondenza delle due postazioni di riferimento P1 e P2 collocate nel compartimento 2. L'andamento è molto simile, anche se la simulazione registra valori più alti durante l'intero sviluppo dell'incendio per entrambe le postazioni. Ciò è, molto probabilmente, conseguenza di una valutazione fatta dal software non su valori puntuali ma su valori medi raggiunti nello strato superiore.

Un'analoga situazione si ha per l'andamento della concentrazione di ossigeno. In corrispondenza della postazione P1, la simulazione calcola un valore minimo di concentrazione di ossigeno pari al 13,8 %, mentre il valore sperimentale è pari a 16,4% (Figura 16).

Esaminando ora il confronto tra le concentrazioni di biossido di carbonio (Figura 17), si nota un andamento più graduale dei valori calcolati dalla simulazione, in particolare nella parte terminale dell'incendio. Ciò accade perché, dal 720° secondo in poi, le misure sperimentali rimangono costanti a causa della difficoltà che gli strumenti utilizzati incontrano nel rilevare valori di concentrazione più bassi dello 0,5%. Dal confronto dei grafici in figura 16 e 17 si nota anche come al valore minimo della concentrazione di ossigeno corrisponda il massimo valore della concentrazione di biossido di carbonio, come si vede anche dal confronto dei dati relativi alle varie concentrazioni di monossido di carbonio (Figura 18).

L'andamento complessivo delle curve sperimentali è in ogni caso molto simile all'andamento ottenuto dalla simulazione con il modello a zone, confermandone pertanto la validità dei risultati.

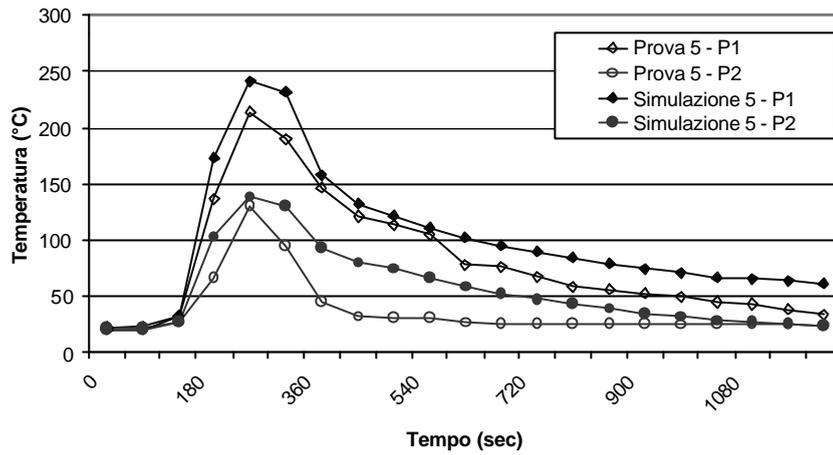


Figura 15. Confronto dati sperimentali – simulazione per i valori di temperatura

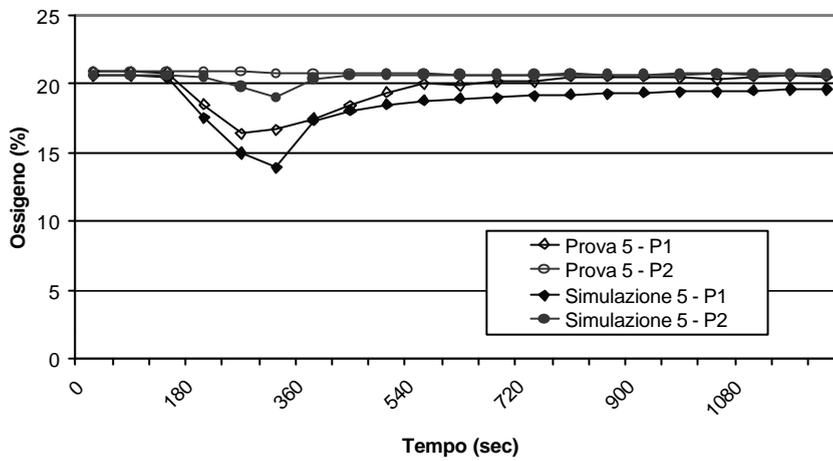


Figura 16. Confronto dati sperimentali – simulazione per i valori della concentrazione di O₂

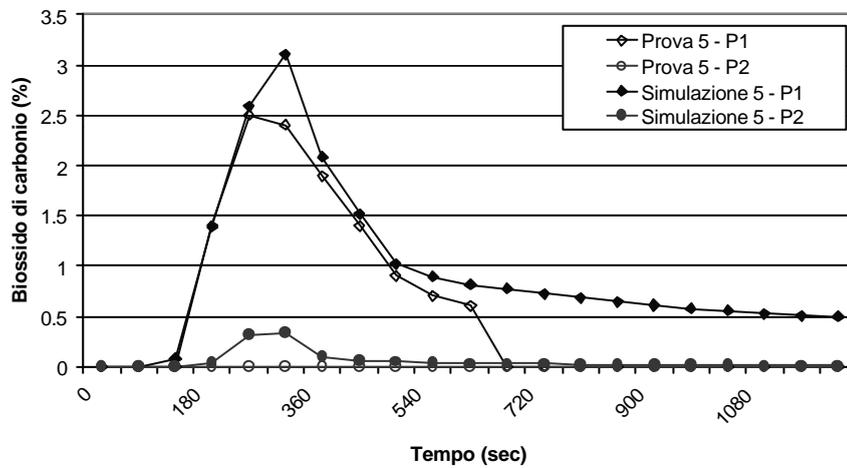


Figura 17. Confronto dati sperimentali – simulazione per i valori della concentrazione di CO₂

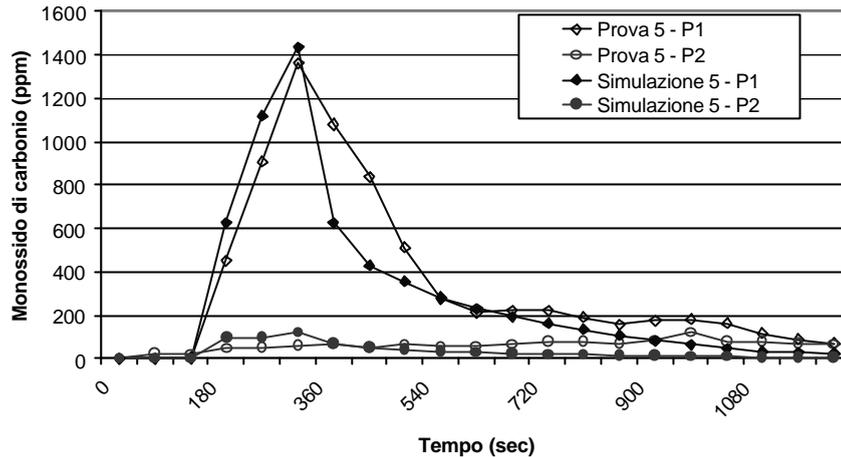


Figura 18. Confronto dati sperimentali – simulazione per i valori della concentrazione di CO

7. CONCLUSIONI

E' stata condotta una campagna sperimentale provocando una serie di incendi in un edificio adibito a sede di uffici; sono stati acquisiti i valori di diverse grandezze, quali la temperatura dei fumi in diversi punti dell'edificio e la composizione degli stessi. I dati rilevati hanno consentito di analizzare le caratteristiche dei fumi, in particolare in relazione al grado di ventilazione dei vari ambienti in seguito all'apertura di porte e finestre. Della campagna sperimentale precedentemente illustrata sono stati riportati, come esempio, i dati relativi a due prove, differenti tra loro solo per il regime di ventilazione.

Il confronto tra i dati delle suddette prove evidenzia la significativa influenza delle condizioni di ventilazione (differente apertura della finestra all'interno della stanza dell'incendio) sia sull'evoluzione termica del fenomeno, sia sulle caratteristiche dei fumi. Tali valutazioni sono di fondamentale importanza per la sicurezza, durante l'evacuazione, delle persone presenti sul luogo dell'incendio, per la sicurezza dell'intervento dei soccorritori e per la previsione delle misure di protezione passiva ed attiva.

È stata, infine, realizzata una simulazione numerica, tramite l'utilizzo di un modello a zone, imponendo le condizioni di uno degli scenari realizzati sperimentalmente. I risultati ottenuti, confrontati con i dati raccolti, consentono di affermare che esiste un buon accordo tra gli andamenti della grandezze in esame (temperature e concentrazioni dei gas) forniti dalla simulazione e dalla sperimentazione.

Gli sviluppi futuri delle attività descritte nel presente lavoro prevedono la realizzazione di modelli matematici per la simulazione degli incendi, creati ed ottimizzati sulla base dei dati sperimentali così raccolti, con lo scopo di migliorare la progettazione architettonica e impiantistica ai fini della prevenzione antincendio.

NOMENCLATURA

- t = tempo (s)
- \dot{m}_i = rateo di massa nel piano i-esimo (kg/s)
- m_i = massa totale nel piano i-esimo (kg)
- P = pressione (Pa)
- V = volume (m³)
- V_i = volume del piano i-esimo (m³)
- $\tilde{\alpha}$ = rapporto tra calore specifico dell'aria a pressione costante c_p (J/kg K) ed il calore specifico dell'aria a volume costante c_v (J/kg K)
- \dot{h}_i = rateo di incremento di entalpia nel piano i-esimo (W)
- \dot{h}_L = rateo di incremento di entalpia nello strato freddo inferiore (W)
- \dot{h}_U = rateo di incremento di entalpia nello strato caldo superiore (W)
- E_i = energia interna nel piano i-esimo (J)
- T = temperatura (K)

T_i = temperatura nel piano i-esimo (K)
 ρ_i = densità del gas nel piano i-esimo (kg/m^3)

BIBLIOGRAFIA

1. S. Marsella, G. Vigne, L'Approccio Ingegneristico alla Protezione degli Incendi, ANTINCENDIO, novembre 1999, pp. 69-76.
2. M. Marchini, P. Iannelli, C. Rubino, Protezione Attiva: Come Gestire l'Incendio di Progetto, FIRE, novembre 2000, pp. 50-56.
3. A. Tewarson, Ventilation Effects on Combustion Products, Toxicology 115, 1996, pp. 145-156
4. V. Bennardo, E. Cafaro – L'evoluzione dei fumi relativi a incendi in ambienti confinati – ANTINCENDIO, dicembre 1994, pp. 13÷19.
5. U. Alberghini, E. Alberghino, Modellizzazione di Incendi in Ambienti Confinati, ANTINCENDIO, febbraio 1995, pp. 25-43.
6. A. La Malfa, Valutazione della Temperatura in un Compartimento durante l'Incendio Reale, ANTINCENDIO, giugno 1998, pp. 11-19.
7. A. Ficarella, R. Lala, D. Laforgia, Simulazioni Fluidodinamiche dello Sviluppo dei Fumi a seguito di Incendi in Strutture Ospedaliere, Convegno Nazionale Sicurezza nei Sistemi Complessi, Bari, ottobre 2001
8. A. Ficarella, R. Lala, P. Perago, D. Laforgia, S. Buffo, Sperimentazione di Incendi su Scala Reale, Convegno Internazionale Vigili del Fuoco Soccorrere in Sicurezza, Roma, aprile 2002
9. ANIA, Comportamento al fuoco dei materiali, dei componenti costruttivi e degli arredi, 1986, pp. 5÷117.
10. Richard D. Peacock, Glenn P. Forney, Paul P. Reneke, Rebecca M. Portier, Walter W. Jones, CFAST the Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, National Institute of Standards Technology, 1991
11. A. Tewarson, Generation of Heat and Chemical Compound in Fires, C.S. Sezione 3, Capitolo 4