

Dalla progettazione antincendio all'investigazione sugli incendi

■ Marcello Mangione

L'abstract

Al giorno d'oggi una raccolta precisa degli indizi permette una ricostruzione realistica dello scenario d'incendio grazie anche all'utilizzo di adeguati software di termo-fluidodinamica computazionale (CFD) e di analisi strutturale (FEA). Con l'utilizzo di tali software è possibile validare le potenziali cause scatenanti e incubate dedotte dal repertamento sulla scena.

Quindi un ruolo determinante dell'attività investigativa è dato dalla simulazione/ricostruzione degli incendi ove i modelli di calcolo, più o meno sofisticati, sono di ausilio nel verificare scientificamente danni e prove indiziarie che l'incendio, doloso o accidentale, ha rispettivamente prodotto o lasciato sulla struttura.

Tali modelli possono semplificare il lavoro del giudice e dell'investigatore nella ricerca rispettivamente sia di giudizi che di indizi.

Risulta fondamentale, in fase d'indagine, per dirimere eventuali dubbi, sovrapporre i risultati dello scenario modellato con lo scenario repertato al fine di valutare la loro corrispondenza.

Per far ciò il fire investigator non deve avere solo esperienza in campo investigativo ma deve conoscere anche come la scena è stata concepita progettualmente.

Una volta che l'investigatore è in grado di produrre un adeguato connubio tra risultati della simulazione e le tracce riscontrate sulla scena d'incendio, si può supporre di aver raggiunto un traguardo soddisfacente per la deduzione e ricostruzione del nesso eziologico in ambito giudiziario.

La continua innovazione nel settore scientifico sta portando anche alla standardizzazione delle procedure di investigazione attraverso un protocollo unico standardizzato.

La normativa sulle costruzioni adottata in ogni Paese ha come fattore comune la resistenza al fuoco minima che devono possedere gli elementi portanti affinché venga garantito un tempo sufficiente per la completa evacuazione dell'edificio e per le necessarie operazioni di soccorso.

La tabella 1, a titolo di esempio, mostra i requisiti di resistenza al fuoco che devono possedere le strutture a diversa destinazione d'uso in Spagna.

Una preventiva conoscenza della forma geometrica e della disposizione delle armature in un elemento in calcestruzzo armato gioca un ruolo fondamentale non solo a livello progettuale ma anche investigativo in caso di collassi strutturali a seguito di incendio e/o esplosione.

Sapere, a titolo di esempio, nel caso di presenza elementi strutturali in acciaio appartenenti al volume d'indagine, se su di essi era applicata preventivamente una vernice intumescente indirizza il fire investigator sul tipo di tracce ed effetti da aspettarsi sulla scena d'incendio.

Quindi l'ingegneria antincendio rappresenta il punto di partenza per una corretta investigazione prestazionale sugli incendi.

Non a caso la Fire Safety Engineering si svi-

luppa, in ambito industriale e civile, negli Stati Uniti e in Inghilterra sin dagli anni 60', per effetto naturale di estensione dei modelli matematici di fluidodinamica applicati ai casi di sviluppo di fumo e calore.

Ovviamente si cercò di adottare modelli di semplice risoluzione al fine di trovare il giusto compromesso nella ricerca del risultato senza falsificazioni di sorta.

Nell'investigazione forense il problema non è affatto banale.

Il giudice, non essendo un tecnico, deve avere in mano prove e reperti che deve far esaminare al CTU o al perito in uno scenario incidentale senza perdere di vista l'obiettivo da raggiungere.

La modellazione quindi non ha solo l'obiettivo di poter progettare correttamente le strutture resistenti al fuoco ma anche quello di avvalorare ipotesi investigative maturate durante il repertamento.

La Fire Safety Engineering diventa quindi uno strumento strategico per le operazioni peritali se, visto nell'ottica della revers engi-

neering, ci permette di ottenere dati di output significativi a livello investigativo.

Il software Fire Dynamics Simulator (FDS) come tutti i modelli computazionali più o meno sofisticati, nascono per rappresentare scientificamente gli effetti che il calore ed i fumi hanno sugli ambienti o sulle strutture.

La modellazione con FDS o Pathfinder, come mostrato in figura 1, usata spesso in fase progettuale, ha anche lo scopo di simulare l'incendio e l'esodo verificatosi nella struttura con lo scopo di avvalorare tutte le ipotesi ricavate durante le fasi investigative.

Quindi gli scenari d'incendio, in fase progettuale, codificati dalla norma NFPA 101 devono essere scremati al fine di valutare solo quelli compatibili a livello investigativo, per poi arrivare ad un solo scenario reale che si è generato nella nostra struttura da esaminare.

Può anche capitare, soprattutto negli incendi dolosi, che lo scenario reale non sia stato contemplato tra quelli progettuali.

Quindi si passa dagli scenari progettuali a



Tabla 3.1 Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales

Uso del sector de incendio considerado ⁽¹⁾	Plantas de sótano	Plantas sobre rasante altura de evacuación del edificio		
		≤15 m	≤28 m	>28 m
Vivienda unifamiliar ⁽²⁾	R 30	R 30	-	-
Residencial Vivienda, Residencial Público, Docente, Administrativo	R 120	R 60	R 90	R 120
Comercial, Pública Concurrencia, Hospitalario	R 120 ⁽³⁾	R 90	R 120	R 180
Aparcamiento (edificio de uso exclusivo o situado sobre otro uso)		R 90		
Aparcamiento (situado bajo un uso distinto)		R 120 ⁽⁴⁾		

⁽¹⁾ La resistencia al fuego suficiente R de los elementos estructurales de un suelo que separa sectores de incendio es función del uso del sector inferior. Los elementos estructurales de suelos que no delimitan un sector de incendios, sino que están contenidos en él, deben tener al menos la resistencia al fuego suficiente R que se exija para el uso de dicho sector

⁽²⁾ En viviendas unifamiliares agrupadas o adosadas, los elementos que formen parte de la estructura común tendrán la resistencia al fuego exigible a edificios de uso Residencial Vivienda.

⁽³⁾ R 180 si la altura de evacuación del edificio excede de 28 m.

⁽⁴⁾ R 180 cuando se trata de aparcamientos robotizados.

Tabella 1 - Requisiti di resistenza al fuoco adottati in Spagna

quelli compatibili sino ad arrivare ad un unico scenario d'incendio investigativo comparabile con la semiotica dell'incendio al fine di identificarne le cause.

Al riguardo la figura 2 compara le immagini reali della scena con quelle derivanti da modellazione. Le immagini delle simulazioni riportate dimostrano che una attività di Structural Fire Investigation è una lezione inversa di Progettazione Strutturale Antincendio rappresentando due facce della stessa medaglia.

Esse sono due discipline che si concentrano sui metodi di reverse engineering e tecniche di back-analysis complementari aventi in comune gli strumenti di simulazio-

ne e di modellazione dello scenario d'incendio. La modellazione diventa quindi il fattore comune nell'analisi degli incendi su strutture confinate soggette ad affollamento come discoteche, teatri, metro, ecc. (vedasi figura 3).

L'investigazione sugli incendi confinati raggiunge diversi livelli di accuratezza in funzione dei modelli d'incendio e del modello strutturale adottato.

Maggiore è la precisione del modello e dello scenario investigativo, maggiore sarà l'affidabilità del risultato investigativo ottenuto.

La figura 4 schematizza il livello di indagine in funzione di tali due parametri.

Come di evince nella figura 4, dall'asse orizzontale le indagini sulla struttura possono essere condotte secondo diversi livelli strutturali:

- analisi investigativa per elementi cioè comportamento del singolo membro in cui tutte le indagini sono effettuate al fine di assumere dati chiave per l'indagine in cui ogni elemento della struttura è valutato considerando completamente separata dagli altri elementi;
- analisi di parti strutturali ossia disamina del comportamento della parte strutturale

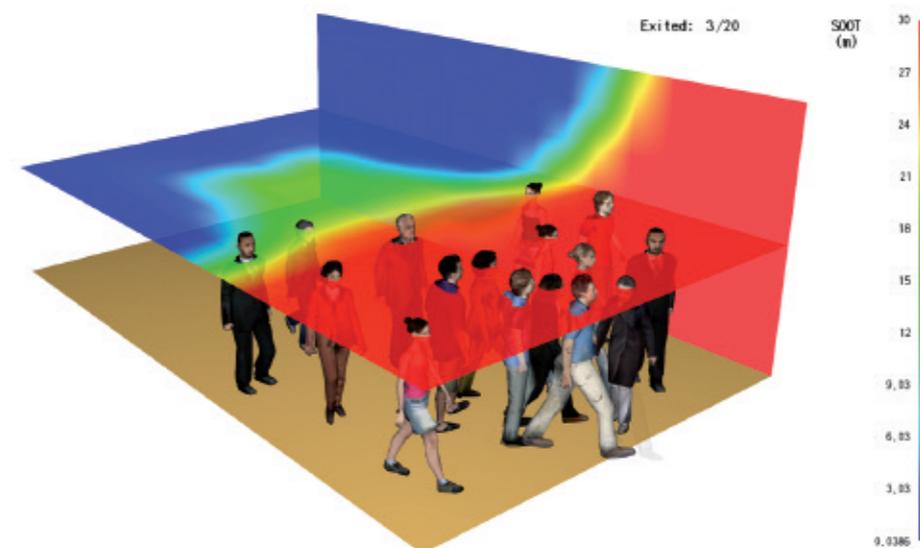
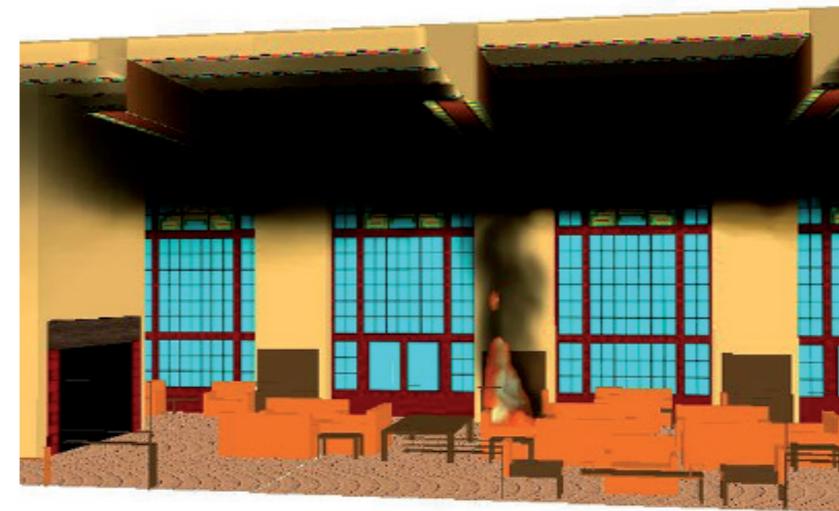


Figura 1 - Esempio di modellazione con il codice FDS+Evac e Pathfinder

(portale, telaio, ecc.) utilizzando le condizioni al contorno;

- analisi globale cioè comportamento dell'intero edificio, in cui la struttura è considerata nella valutazione indagine nel suo complesso.

E tenendo dei vari livelli di modellazione dell'incendio (asse verticale):

- curve parametriche e reali dell'incendio;
- accuratezza del tipo di modellazione (a zone, di campo, ecc.).

Scenari progettuale e scenario investigativo convergente

Gli scenari di progetto antincendio per le strutture partono da ipotesi che non sono le stesse delle investigazioni, ossia gli incendi che portano al collasso o a danni importanti e che si verificano, non sono quelli di progetto per le strutture collassate o danneggiate.

È di fondamentale importanza, sia in fase investigativa che in fase progettuale, sovrapporre i

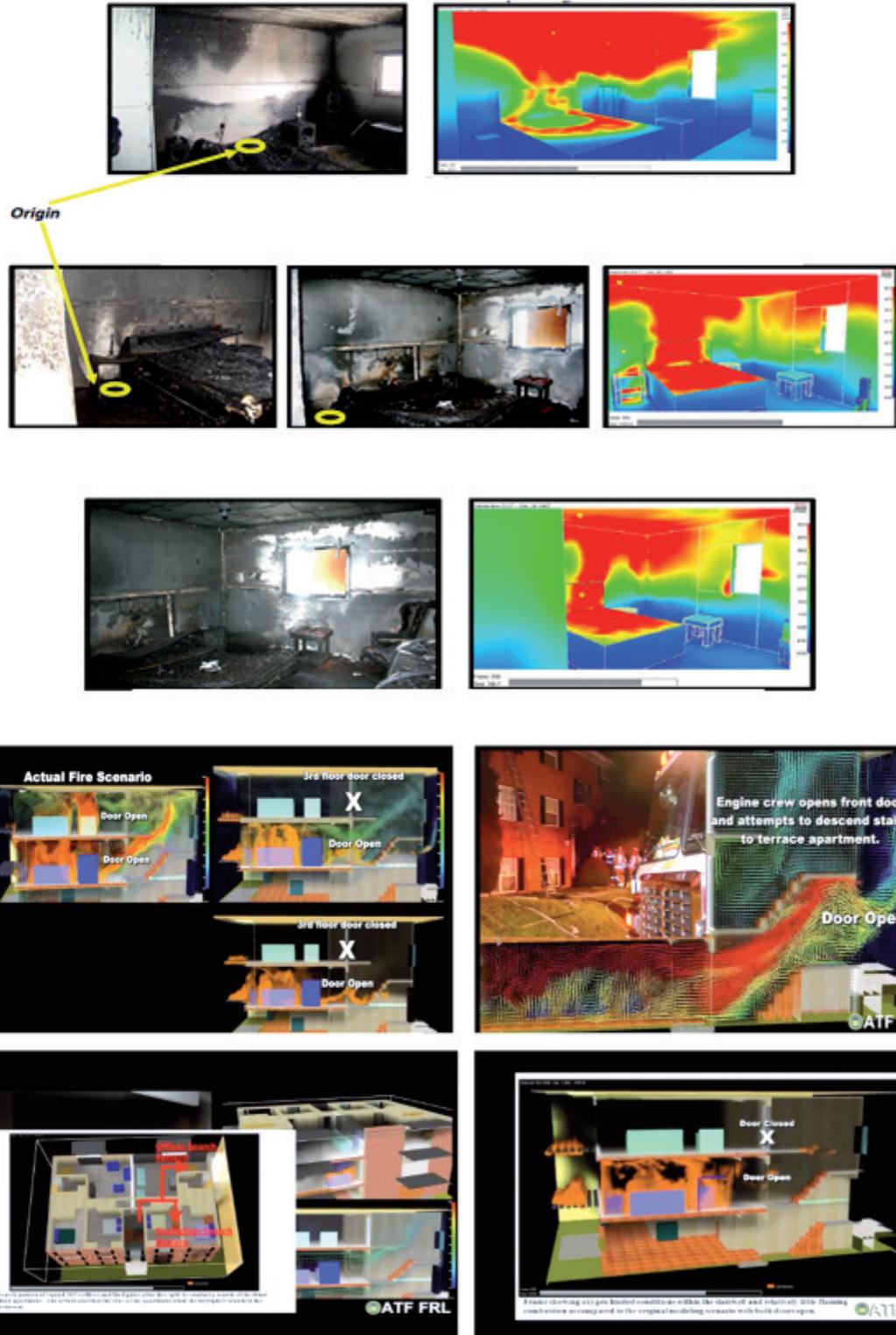


Figura 2 - Repertamento e modellazione

risultati dello scenario modellato con quelli ipotizzati.

Per determinare il tipo di sviluppo dell'incendio bisogna valutare l'Opening Factor O (fattore di ventilazione).

Esso, infatti, modifica significativamente il valore massimo che può raggiungere la velocità di combustione (kg/s di combustibile bruciato) ed è definito come segue:

$$O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t}$$

dove:

A_v : area delle aperture verticali [m²]

h_{eq} : altezza equivalente delle aperture verticali [m]

A_t : area totale del compartimento [m²]

Se $O < 0.06 \div 0.07$ allora lo sviluppo dell'incendio è controllato dal combustibile.

Generalmente l'incendio, nelle prime fasi, ignizione e crescita, è controllato dal combustibile e, successivamente, in particolare dopo il Flashover, diventa controllato dalla ventilazione (Figura 5).

L'Opening Factor in ambito progettuale rappresenta la normalizzazione del compartimento, rispetto alla superficie totale del compartimento stesso, sotto il profilo dell'apporto di aria comburente.

In ambito investigativo occorre invece considerare la scena reale con le effettive condizioni di ventilazione. In particolare si deve tener conto della ventilazione di una scena per rottura/apertura di porte e finestre a seguito di:

- effrazioni in caso di incendio doloso
- rotture da esplosione iniziale (ad esempio per innesco da pozze di benzina);;
- rotture termiche dei vetri durante lo sviluppo dell'incendio nei vari vani;
- rotture/aperture necessarie ed operate dai V.V.F. durante l'intervento.

Al riguardo appare opportuno definire un fattore di apertura di natura squisitamente inve-

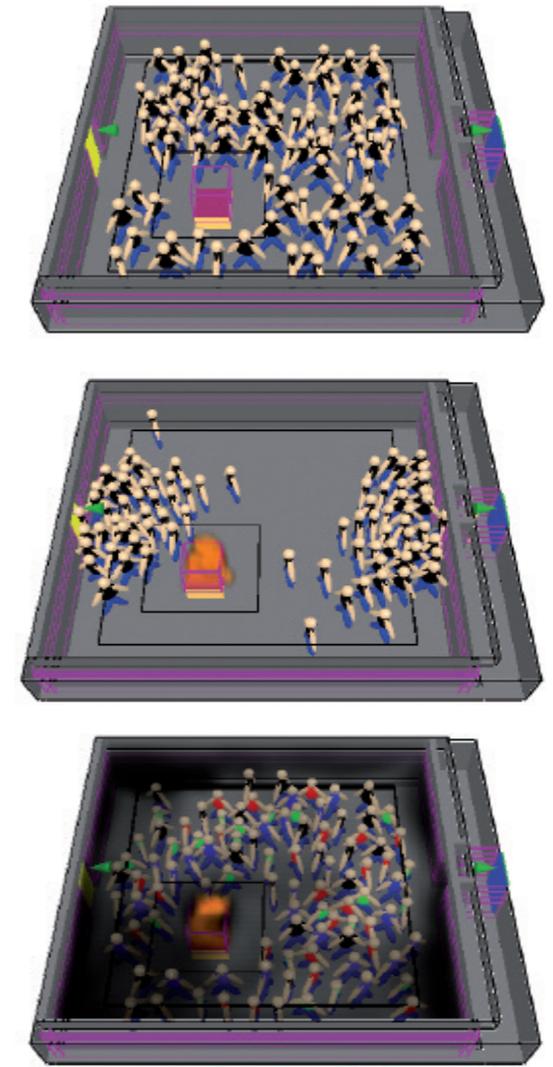


Figura 3- Modellazione dell'incendio in locali suscettibili di affollamento

stigativa che ricalca quello già definito in fase progettuale.

La seguente formula definisce l'Opening

$$O_{inv}(t) = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t}$$

ove nel calcolo della ventilazione tale fattore tiene conto delle aperture effettive dovute ad effrazione iniziale e rotture termiche/meccaniche durante l'incendio/esplosione in funzione del tempo.

	Structural Model	Materials	Single elements	Sub frame assemblies	Part of the Structure	Real Structures
Fire Model						
Increasing linear temperature		Shallow				
Standard Fires						
Equivalent Fire						
Parametric Fire						
Localised Fire		Acceptable				
Zone Model Defined						
Field Model Defined		Accurate				
Real Fire						

Figura 4 - Livelli investigativi in funzione della struttura e del modello d'incendio

Per tale motivo l'O inv è un coefficiente dinamico che varia nel tempo in funzione della sequenzialità delle rotture dei vetri degli infissi.

Possiamo affermare che in ambito investigativo la scena dell'incendio possiede la seguente ventilazione somma di due coefficienti:

- il primo non dipendente dal tempo rappresenta la ventilazione iniziale dovuta alla superficie originatasi per effetto dell'effrazione (figura 6);

- il secondo dipendente dal tempo tiene conto della sequenzialità delle rotture termiche/meccaniche;

$$O_{inv_{totale}} = O_{inv_{effrazione}} + \sum_{i=1}^n O_{inv}(t)_{breaking\ i-esimo}$$

nel caso di incendi accidentali (non dolosi) in genere si ha che: $O_{inveffrazione} = 0$

L'apertura/rottura di infissi risulta un parametro

17/91

L'azione incendio: il fenomeno fisico

Incendi controllati da ventilazione o dal combustibile

• incendi averti sviluppo controllato dalla superficie di ventilazione

BIG OPENING / FEW FUEL → FUEL CONTROLLED FIRE

Rate of combustion can reach the maximum!
Fire developing is governed by fuel properties (exposed area and quantity)!

• incendi averti sviluppo controllato dal combustibile

SMALL OPENINGS / MUCH FUEL → VENTILATION CONTROLLED FIRE

Rate of combustion can't reach the maximum because limited oxygen inflow!
Fire developing is governed by fuel compartment properties (air flow factor)!

VENTILATION CONTROLLED FIRE

HIGHEST TEMPERATURE IN THE ELEMENTS

SAFE SIDE ASSUMPTION!

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

PROGETTAZIONE STRUTTURALE ANTINCENDIO
www.francobontempi.org

SW
0/N
/GER

Figura 5 - Curva HRR al variare della ventilazione e del carico d'incendio (Ing. F. Bontempi).

fondamentale per valutare la propagazione di un incendio in una scena investigativa.

Un esempio di grafico che tiene conto delle aperture degli infissi è riportato in figura 7.

Il calcolo della temperatura di rottura di un vetro mono-strato appartenente ad un infis-

so di determinate dimensioni è possibile eseguirlo anche grazie al software break1 disponibile sul sito del NIST.

La rottura progressiva dei vetri rappresenta un elemento chiave per dedurre la ventilazione interna, la propagazione dei fumi, ecc.

Al riguardo occorre precisare che le informa-

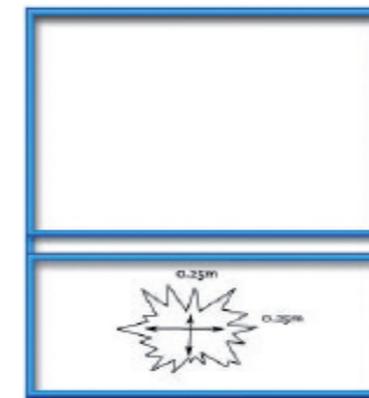


Figura 6 - Segni di effrazione su finestre

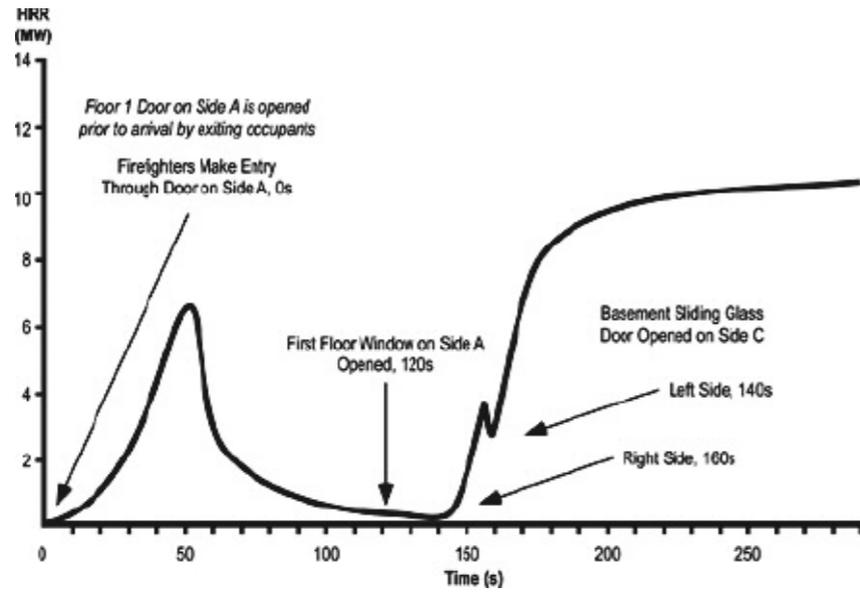


Figura 7 - Variazione della potenza termica in funzione della ventilazione degli infissi

zioni relative ai principali eventi, duraturi e non, e le varie testimonianze servono per generare una timeline che rappresenta nell'ambito dell'ingegneria forense una vera e propria cronologia di indizi.

Tale sequenza incidentale si integra man mano che si ottengono i risultati dell'investigazione (esempio in figura 8). La parte superiore della timeline è chiamata il soft time ed è costruita mappando la rac-

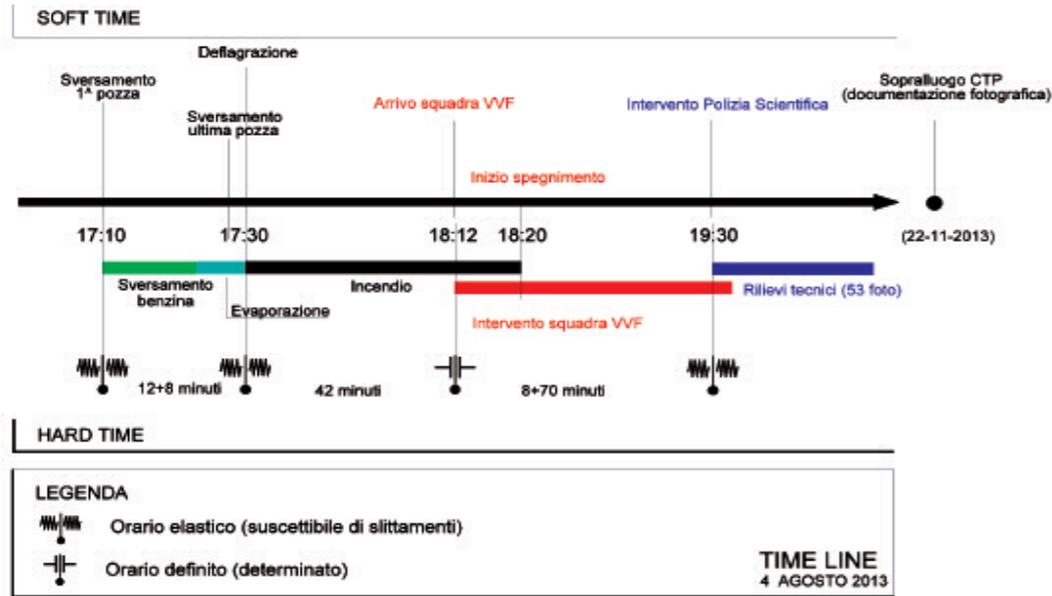


Figura 8 - Sequenza incidentale

Continua a pag. 63

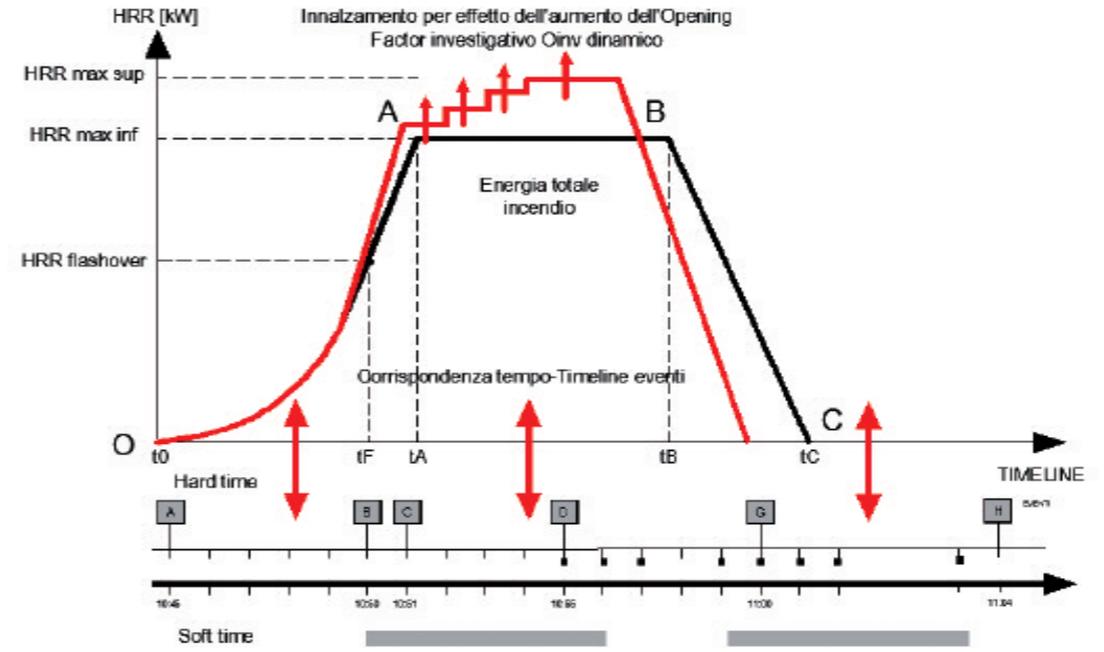


Figura 9 - mVariazione della ventilazione nella curva HRR-t in ambito investigativo

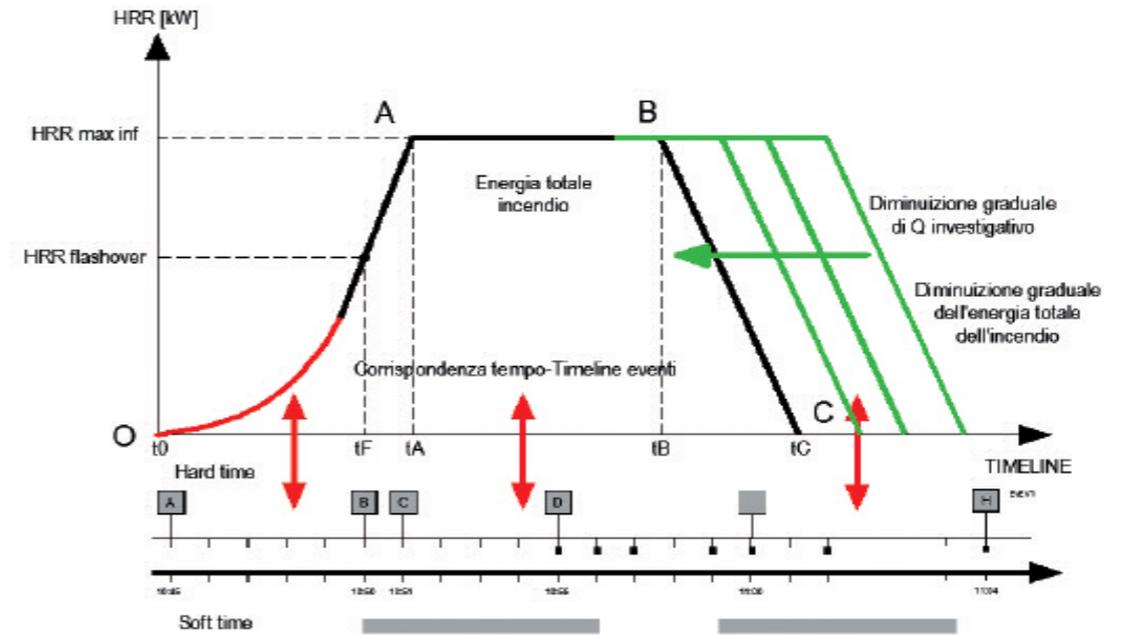


Figura 10 - Variazione del carico d'incendio in una curva HRR-t in ambito investigativo

	Progettazione Strutturale Antincendio	Investigazione Prestazionale sugli incendi
Curva incendio	Curve parametriche, standard	Curva naturale dell'incendio tenendo conto delle sue caratteristiche
Scenari d'incendio	Diversi scenari su aree prestabilite dettate dalle norme	Unico scenario convergente
Punti di innesco	Singoli e prestabiliti dalle norme nella definizione degli scenari d'incendio	Singoli e/o multipli. Puntiformi o su superfici estese
Carico d'incendio	Carico di incendio specifico di progetto uniformemente distribuito sulla superficie.	Carico di incendio effettivamente presente al momento dell'incendio tenendo conto dell'esatta distribuzione planimetrica di esso.
Ventilazione	Ventilazione statica progettuale Opening factor	Ventilazione dinamica effettiva Opening factor investigativo
Aerazione interna	Compartimentazione progettuale	Da ricostruire in maniera reale al momento dell'incendio durante le operazioni di repertamento
Protezione attiva	Progettazione in funzione del carico d'incendio, rischio incendio, ecc.	Investigazione sul funzionamento e manutenzione degli impianti esistenti
Protezione passiva	Progettazione in funzione della tipologia strutturale, ecc.	Investigazione sulla corretta posa in opera delle protezioni e dei sistemi di compartimentazione.

Tabella 2 - Valutazione di alcuni parametri in fase progettuale ed investigativa

colta puntuale degli eventi chiave (testimonianze, orario del boato, rottura del primo innesco, ecc.) che rappresentano indizi molto utili per la successiva modellazione.

Il lato inferiore della timeline, noto come hard time è destinato a classificare eventi chiave più durevoli come la durata dell'incendio sino allo spegnimento, tempi di intervento delle squadre dei VV.F., ecc.

Le due parti convergono su un singolo grafico che visualizza la posizione temporale dei dati e rappresenta, come già detto, un asse temporale degli indizi.

Tale asse è un elemento fondamentale di raffronto per il successivo calcolo della curva d'incendio reale da ricavare.

La timeline è considerata una metodologia affidabile per la mappatura cronologica della catena di eventi che culminano in un incen-

dio in quanto consente agli investigatori di identificare informazioni mancanti.

La linea temporale consente di evidenziare i componenti chiave della catena di eventi, così come altri elementi contestuali, rappresentando l'intero incidente.

Quanto maggiore è il ritardo tra l'incidente e l'investigazione, tanto più difficile è la ricerca degli indizi.

I concetti sopra esposti relativi all'Opening factor investigation dinamico e sequenza incidentale si possono meglio raggruppare nella figura 9. Il concetto riferito invece alla variazione del carico di incendio Q comporta una variazione della curva HRR-t meglio illustrata nella figura 10.

In definitiva, dai concetti precedentemente esposti, sussiste un dualismo tra progettazione ed investigazione.

La tabella 2 indica sommariamente come alcuni parametri devono essere valutati in fase progettuale e/o investigativa.

Considerazioni finali

Spesso durante le operazioni di repertamento sorgono problemi riguardanti:

- la scarsa conoscenza strutturale della scena;
- il grado di accuratezza con il quale vengono raccolte le prove (per esempio troppe ore dopo l'accaduto, indizi non reperiti, ecc.);
- la creazione di verbali, in alcuni casi contrastanti tra loro, rilasciati da diversi operatori (V.V.F., CC, CTU, ecc.).

Quindi in caso di incendio, se le prove fossero raccolte ed esaminate con delle regole standardizzate, allora queste potrebbero essere usate anche nello stesso modello di simulazione, per rappresentare possibili varianti diverse dello svolgimento dello scenario.

La vera rivoluzione è quella di definire le regole investigativi più idonee e poi usare sempre lo stesso metodo sia per le ulteriori prove raccolte e sempre lo stesso metodo di rappresentazione (Fds, Cfast, Aset, Pyrosim, ecc).

Al riguardo quindi è opportuno codificare, nello stesso linguaggio, una progettazione comune dell'attività investigativa.

Se le prove fossero raccolte ed esaminate con un Protocollo Unico Investigativo, allora queste potrebbero essere riusate ed integrate per rappresentare possibili varianti.

Quindi l'utilizzo di tecnologia e nuovi strumenti informatici, al fine di migliorare e razionalizzare il lavoro investigativo, ricopre un ruolo fondamentale.

Lo scopo del protocollo standardizzato è quello quindi di uniformare un metodo codificato che eviti di sottovalutare/dimenticare alcune prove nelle valutazioni dello scenario d'incendio.

Nell'ambito investigativo, la soluzione deve

essere perfettamente sovrapposta allo scenario repertato, altrimenti non è sufficientemente preciso il calcolo condotto oppure non è sufficientemente esaustivo il repertamento.

La conseguenza è quella di non aver ricostruito un chiaro nesso eziologico e consegnare, in sede giudiziaria, un report impreciso di partenza.

Ringraziamenti

Si ringrazia per la stesura del presente articolo:

- il Prof. F. Bontempi il quale, durante il dottorato di ricerca, mi ha fatto scoprire con passione l'interessante settore dell'investigazione forense;
- l'Ing. Guillem Peris-Savol per i preziosi consigli datomi nel settore della modellazione degli incendi.

Bibliografia

- Augenti N., Chiaia B. M.: Ingegneria Forense, Dario Flaccovio Editore, Ed. 2011.
- Bontempi F.: Appunti del corso di progettazione strutturale antincendio - Università La Sapienza Roma, A.A. 2016/17;
- Bontempi F., Crosti C., Mangione M.: - L'investigazione antincendio sugli aspetti strutturali: una proposta di codifica- Rivista Antincendio, ottobre 2015;
- Bontempi F.: Ingegneria Forense in campo strutturale, Dario Flaccovio Editore, Ed. 2017;
- Caira L., Mangione M., Bontempi F.: Comportamento umano in caso di incendio: modelli di evacuazione - Rivista Ingenio, aprile 2017;
- Gregory E. Gorbett, Msc, CFEI, CFPS, IA-AI_CFI, MIFireE: Computer Fire Models for fire investigation and reconstruction - International Symposium on Fire Investigation Science and Technology- ISFI 2008;
- Høgskolen Stord/Haugesund - Studie for ingeniørfag: The use of simulation in fire investigation - 2009;
- <http://cfbt-us.com/wordpress/?tag=nist>;
- <http://www.fireservicewarrior.com/2012/09/the-good-and-bad-of-ventilation/>;
- Mangione M., F. Bontempi, Crosti C.: Structural Fire Investigation e Ingegneria Forense - Atti del convegno IF CRASC'15 - 14-16 maggio 2015 - Università La Sapienza - Roma;
- NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations;
- NFPA 101: Life safety code.