



STRUCTURAL FIRE INVESTIGATION E INGEGNERIA FORENSE

M. Mangione

Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

F. Bontempi

Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

C. Crosti

Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

SOMMARIO

Il ruolo della *Fire Investigation*, intesa come attività investigativa, riguarda l'esame degli episodi legati agli incendi con la finalità di determinarne le cause.

Tale disciplina entra nel campo dell'ingegneria forense, abbracciando diversi ambiti e diventando ancora più specialistica se incentrata nella *Structural Fire Investigation* ove le indagini strutturali hanno lo scopo di ricostruire il *nesso eziologico* fondato su principi scientifici che coniugano l'ingegneria strutturale con il diritto.

L'investigazione ingegneristica costituisce una metodologia di *reverse engineering* che utilizza tecniche di *back-analysis* basate sulla *Fire Safety Engineering* divenendo così un'attività progettuale complementare (*Investigation planning process*) valida nei procedimenti giudiziari riguardanti incendi dolosi (*Arson investigation*), colposi o accidentali. In tale contesto l'*ingegnere antincendio* in ambito forense è quel professionista che, in senso lato, indaga su tutte le cause scatenanti e pregresse che hanno determinato l'incendio mentre, in senso stretto, è parte attiva in un procedimento giudiziario come consulente tecnico. In tal senso la *Structural Fire Investigation* si pone l'obiettivo di presentare una metodologia di analisi mettendo in risalto le aree d'interesse tecnico-giuridico ove lo studio accurato delle causalità degli eventi gioca un ruolo determinante.

ABSTRACT

The role of the *Fire Investigation*, understood as investigating activity, concerns the examination of incidents related to fires with the aim to determine their causes.

This discipline falls within the field of forensics engineering, embracing different spheres and becoming even more specialized if centered in *Structural Fire Investigation* where the structural investigations are intended to reconstruct the causal link based on scientific principles that combine structural engineering with the law.

The engineering investigation is a *reverse engineering* methodology that uses techniques of *back-analysis* based on the *Fire Safety Engineering*, thus becoming an additional design activity (*Investigation planning process*), valid in legal proceedings relating to arson (Arson investigation), malicious or accidental.

In this context, the *fire forensic engineer* becomes the professional who, in a broad sense, investigates all the causes - past and present - that led to the fire and, strictly speaking, is an active part in the proceedings as a consultant technician.

In this sense, the *Structural Fire Investigation* aims to present an analysis method, which highlights the technical and legal areas of interest where the accurate study of the causality of events plays a crucial role.

1. INTRODUZIONE

Un potenziale successo investigativo nel campo della *Fire Investigation* deve basarsi su una chiara e codificata metodologia di investigazione.

Il processo investigativo-strutturale, in qualche modo disciplinato dalla norma NFPA 921 *Guide for Fire and Explosion Investigations*, riguarda l'esame e l'analisi delle strutture danneggiate e richiede una solida conoscenza della progettazione strutturale antincendio necessaria per l'identificazione delle possibili cause d'incendio.

La *Structural Fire Investigation* crea un dualismo complementare alla *Structural Fire Engineering* ove i parametri costruttivi e gli scenari di contingenza, utili nella fase progettuale, diventano elementi investigativi in caso di mancata *performance*.

Si parte quindi dalla progettazione investigativa antincendio (*as failure/damage*) sino a verificare il concepimento progettuale della struttura (*as design*), rapportando i dati reperiti con quelli costruttivi con l'obiettivo di evidenziare deficit e carenze progettuali, esecutive e gestionali necessari per l'identificazione dei profili di responsabilità.

La bravura dell'investigatore sta nel ricostruire il puzzle strutturale, collocato in un contesto complesso, ove la mancanza di più pezzi fa lievitare risultati dubbi e quindi contestabili in sede legale.

2. INGEGNERIA FORENSE E FIRE INVESTIGATION

La norma NFPA 921 definisce la *Fire Investigation* come *il processo per determinare le origini, le cause e l'analisi dei guasti di un incendio o esplosione*.

Tale disciplina trova collocazione nella *forensic engineering* la quale si differenzia dall'*ingegneria giuridica* proprio per il fatto che essa si esplica nella fase processuale ed extragiudiziale con lo scopo di fornire risposte di carattere tecnico-scientifico a problemi giuridicamente rilevanti.

Essa esamina, dunque, le questioni tecniche in rapporto alla giurisprudenza, cercando di far convergere il pensiero dei tecnici e dei giuristi.

Il *Fire Investigator* deve utilizzare un metro di valutazione che collimi con quello del giurista al fine di evidenziare gli errori (*negligenza, imperizia, imprudenza, ecc.*) e selezionando quelle che non hanno un nesso diretto con l'incendio.

L'obiettivo cardine è quello di raggiungere la verità processuale sulla base di dati certi e scientificamente provati.

Espletandosi in fase processuale l'attività di *Fire Investigation* inizia con una pianificazione preventiva dell'evento accidentale, per poi estendersi, successivamente con l'espletamento di tutta una serie di fasi ispettive interne ed esterne, alla struttura oggetto di investigazione. La natura delle indagini da condurre potrebbe seguire percorsi diversi in rapporto alla committenza che le ha richieste (Società assicurativa, Autorità giudiziaria, ecc.) ed in funzione della complessità del quesito peritale/obiettivo richiesto.

Il *fire investigator*, alla fine dell'attività investigativa, predispone, per affrontare il processo come parte attiva, un *reporting* che riporta le risposte ai quesiti peritali posti dal giudice mettendo in risalto, in tutto il lavoro svolto, la metodologia adottata e la sua fondatezza scientifica al fine di definire compiutamente il nesso eziologico tra causa ed evento incendio.

La figura 1 riporta le attività di *Fire Investigation* inserite in un contesto prettamente giuridico.

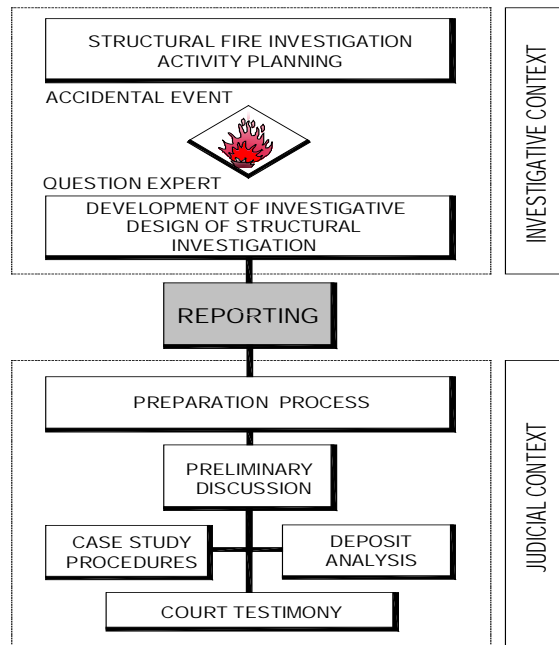


Figura 1. Stages of the legal process.

Lo sviluppo delle indagini (*development of investigative*) può essere meglio distinto in cinque fasi, rappresentate in figura 2, che l'investigatore potrà seguire al fine di giungere alla conclusione delle indagini.



Figura 2. Development of investigative step.

Fondamentalmente le fasi proposte riguardano controlli ispettivi esterni ed interni alla struttura danneggiata nonché le attività/simulazioni da espletare fuori dalla scena oggetto di indagine.

Tutte le attività portano a definire una progettualità dell'attività investigativa (*investigation planning process*) con elaborazione anche di mirati schemi grafici (percorso del fuoco, affumicature, mappatura dei danni, ecc.).

La progettazione investigativa, incentrata sul quesito peritale, rappresenta uno strumento di ausilio che mette in relazione i risultati del consulente tecnico con l'autorità giudiziaria che deve emettere un giudizio. Nella figura 3 si mette in evidenza come carenze di valutazione, errori nella raccolta dei dati nel corso del sopralluogo o simulazioni non attinenti alla situazione reale portano, per ogni fase, a dei parziali fallimenti che, combinati fra loro secondo la sequenza illustrata nel grafico, possono portare al fallimento globale dell'intera attività investigativa.

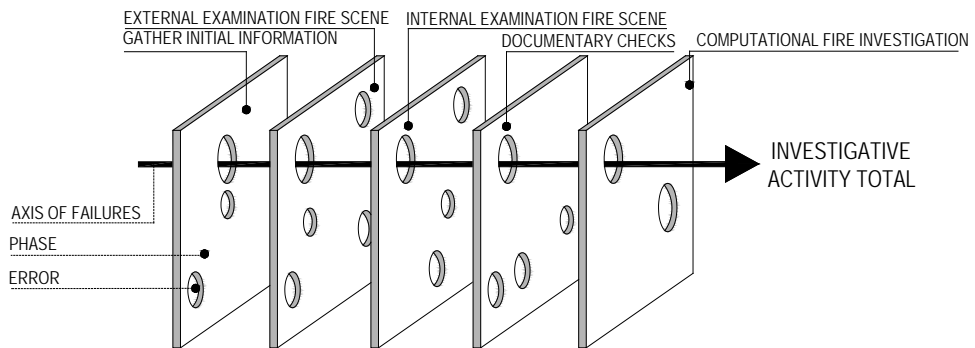


Figura 3. Swiss cheese model for the development of a failure in the Fire Investigation.

3. NESSO EZIOLOGICO E PROFILI DI RESPONSABILITA'

Come già accennato, l'attività di *Structural Fire Investigation*, nell'esaminare la complessità dei parametri dell'incendio, applica metodi di analisi e di valutazione con l'intento di acquisire il nesso eziologico necessario in tutti i procedimenti giudiziari.

In genere è nel campo giuridico ed in quello assicurativo che l'eziologia di un incendio riveste un ruolo di primaria importanza con la ricerca della dolosità o meno dell'evento

accidentale. Quindi è molto importante l'individuazione precisa delle cause, o almeno le più probabili e di conseguenza l'indagine, espletata per la sussistenza del nesso eziologico, deve prendere di mira il rapporto fra le varie cause, al fine di accertare se quelle prossime siano fattori eccezionali, avulsi dalla serie causale precedente, ovvero ne costituiscano solo lo sviluppo naturale.

Il parametro di valutazione del nesso eziologico, adottato dalla giurisprudenza e ricercato dall'investigatore, è volto quindi alla determinazione dell'efficienza causale della colpa (o di ciascuna colpa concorrente) realizzatasi con la condotta.

Non si può certo ignorare che i parametri di valutazione per l'accertamento dell'eziologia fra condotta ed evento vengono a coincidere con gli elementi costitutivi caratteristici della colpa. Ed invero l'individuazione della colposità della condotta è al tempo stesso anche il fulcro dell'accertamento del nesso di causalità.

In altri termini, non riveste dignità eziologica quella condotta che non integra gli estremi della colpa.

I due elementi del reato appaiono come due facce della stessa medaglia, con una inversione nel *modus operandi* dell'accertamento.

L'investigatore deve poter dimostrare che la propria testimonianza appartiene alla conoscenza scientifica che "costituisce uno standard di affidabilità dell'evidenza" (prova).

Non di meno nello svolgimento delle attività investigative, il concetto di causalità, intesa come relazione che lega un atto all'evento, rappresenta un elemento cardine allo stesso modo del *nesso*, che rappresenta invece la forza naturalistica che causa l'evento.

Possiamo affermare che:

- la causalità è la relazione tra un evento(causa) ed un secondo evento (effetto), dove il secondo evento viene inteso come conseguenza del primo;
- il nesso causale è la connessione tra una causa e un effetto ed è studiato al fine di ricavare la riconducibilità di un dato evento all'atto presupposto.

Le cause gli effetti sono in genere legati ai cambiamenti, eventi o processi.

Le cause sono spesso distinte in due tipi:

- *necessarie* quando contribuiscono all'effetto; se X è una causa necessaria di Y, ($X \rightarrow Y$) allora la presenza di Y implica necessariamente la presenza di X. La presenza di X, tuttavia, non implica che Y si verificherà;
- *sufficienti* se X è una causa sufficiente di Y, ($X \rightarrow Y$) allora la presenza di X implica necessariamente la presenza di Y.

Tuttavia, un'altra causa Z può, in alternativa causare Y, ($Z \rightarrow Y$). Quindi la presenza di Y non implica la presenza di X.

Ogni episodio incidentale rilevante può quindi derivare da più cause interferenti tra loro attraverso sequenze logiche di accadimenti.

E' un errore assai frequente, in ambito forense, focalizzare l'attenzione su un singolo episodio, magari scatenante la dinamica dell'incendio, ma decontestualizzandolo dalla dinamica del fatto, dall'interazione con altre concause e dalla sua vita utile.

La figura 4 mostra due tipologie di controllo che l'investigatore deve effettuare al fine di ridurre il rischio di errore nella valutazione.

Il primo tipo di controllo è del tipo *lineare e consequenziale*, esso mostra come le cause in generale portano a una sequenza di *evidenze* per arrivare alle *deduzioni* e alle *verifiche di compatibilità*.

Da ogni evidenza, possono derivare una o più deduzioni, a volte antitetiche tra loro, da valutare attraverso un giudizio di compatibilità.

Il secondo controllo è di tipo *circolare* e parte dalle evidenze. Esso, articolandosi in quattro fasi, verifica:

- se l'evidenza è compatibile con la deduzione di massima (*phase 1*);
- se la deduzione riscontrata è accettabile e consequenziale alle cause (*phase 2*);
- se le cause hanno carattere di compatibilità con quanto già affermato (*phase 3*);
- la compatibilità totale è ricollegabile alle evidenze ed al controllo lineare (*phase 4*).

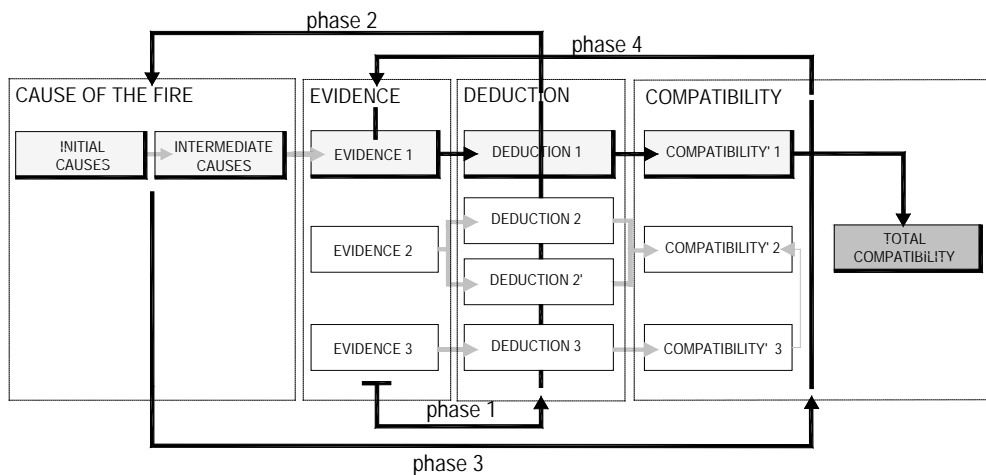


Figura 4. Fire Investigation- interactive cycles.

Per entrambi i controlli valgono le seguenti regole:

- l'evidenza è rappresentata dal rilievo materiale o documentale a carattere probatorio;
- la deduzione deriva dalla singola evidenza;
- la compatibilità accerta l'ammissibilità della deduzione con quelle derivanti da altre evidenze;
- la compatibilità totale compara le singole compatibilità.

Sull'analisi dei dati, l'investigatore deve saper sviluppare delle ipotesi per spiegare l'origine e la causa di incendio. Queste ipotesi devono basarsi sui dati raccolti e verificati tramite un ragionamento deduttivo. Se le ipotesi non provengono da un ragionamento deduttivo, devono essere scartate poiché non dimostrabili in sede giudiziaria. Occorre raccogliere quindi nuovi dati e rianalizzare quelli esistenti. Questo processo diventa interattivo fino a quando tutte le ipotesi sono state testate. In caso contrario, la causa di incendio rimane indeterminata. Il diagramma *Fishbone* ideato da Ishikawa, illustrato nella figura 5, è uno strumento di gestione per l'analisi delle cause e può essere di ausilio nelle attività di

Structural Fire Investigation con lo scopo di ricostruire le cause scomponendole, a sua volta, in sub-cause. Tale diagramma rappresenta lo strumento che fornisce un approccio strutturato alla radice del problema. A capo dello schema vi è il problema che si sta analizzando mentre la struttura rappresenta le cause e le sub-cause del problema da risolvere. Le frecce piccole connettono quindi le sub-cause a quelle principali che a loro volta portano al problema collocato in testa.

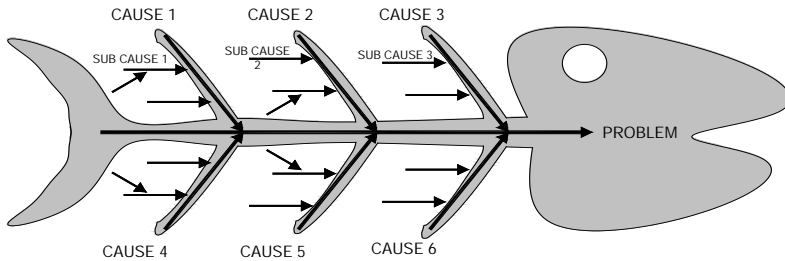


Figura 5. Ishikawa- Fishbone diagram.

L'individuazione delle cause di incendio devono essere definite tenendo conto della vita utile della struttura e della sua storia. La seguente figura 6 mostra l'importanza della ricostruzione temporale delle *performance* di una struttura procedendo a ritroso nel tempo. Nell'ambito della *fire forensic* la ricostruzione investigativa, parte dal fallimento sino ad arrivare all'*as designed*. Un processo di *back-analysis* mette in evidenza tutti i deficit che ha subito la (*history of the structure*). Incentrare le indagini solo sulla causa scatenante (*as failed*) senza conoscere quelle pregresse porta ad una falsificazione della ricostruzione del nesso eziologico con alta probabilità di fallimento dell'intera indagine investigativa.

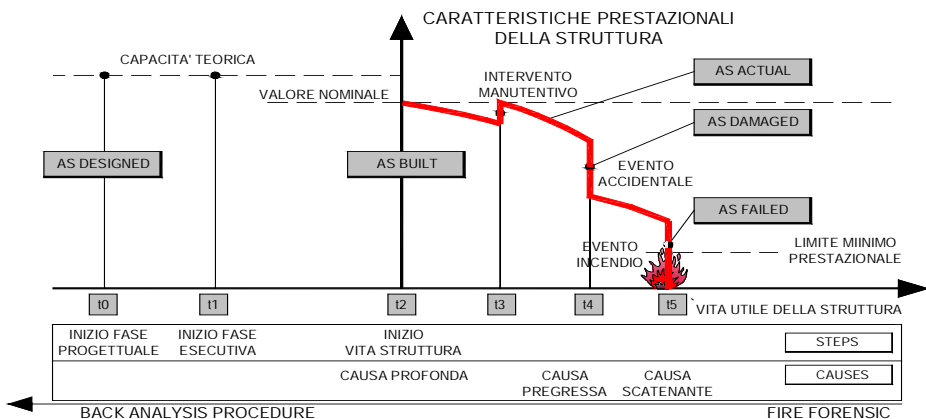


Figura 6. History of the structure in the investigation process.

I profili di responsabilità, (figure 7 e 8), forniscono delle indicazioni immediate al giudice su tutte le cause/errori (*negligenze, imperizie ed imprudenze*) che hanno portato al fallimento strutturale ed individuando lo snodo causale scatenante l'iter fallimentare. Il profilo di responsabilità è tecnicamente un *metodo rappresentativo forense* di ausilio nella formulazione della risposta connessa al quesito peritale. Analizzando la figura 7, possiamo esporre, a titolo di esempio, il fallimento strutturale dovuto ad incendio ove le fasi, le cause connesse e le figure professionali investite sono state riepilogate nella tabella 1.

PERIODO E FASE	FIGURA INTERESSATA	ERRORE
t0 Progettuale dell'opera (errori sull'approccio progettuale)	Progettista Tecnico Antincendio	PROGETTUALE (dormiente)
t1 Controllo documentale (mancato controllo sulla progettazione antincendio)	Funzionario VVF	DOCUMENTALE (dormiente)
t2 Fase realizzativa (difficoltà sull'esecuzione lavori)	Direttore dei lavori Ditta esecutrice Direttore Tecnico	ESECUTIVO (latente)
t3 Completamento dell'opera (superficialità nelle operazioni di collaudo)	Collaudatore	ESECUTIVO (latente)
t4 Manutenzione periodica (assenza di manutenzione)	Manutentore Committente	GESTIONALE (pregresso)
t5 Controllo Obbligatorio (assenza o carenza nei controlli periodici)	Tecnico Antincendio Committente	GESTIONALE (scatenante)
t6		FAILED

Tabella 1. Periodi, fasi, figure ed errori.

Esaminando tutte le cause/errori si evince una curva di responsabilità decrescente che parte dall'errore progettuale e termina nella mancata vigilanza sulla struttura.

Nel caso in esame ogni figura ha la sua responsabilità ed il nodo causale scatenante è rappresentato dal mancato rispetto delle norme antincendio ed errata valutazione del rischio incendio con conseguente errore progettuale.

Le colpe vengono attribuite a tutte le figure professionali secondo la gravità delle conseguenze tenendo conto che evitare errori progettuali/esecutivi avrebbe sicuramente portato a minori conseguenze.

Le due curve di responsabilità, variano a seconda della tipologia e numero di cause. La prima si riferisce ad una catena di errori il cui nodo casuale è stata la non corretta progettazione della struttura, la seconda si riferisce invece ad una pessima gestione della manutenzione antincendio.

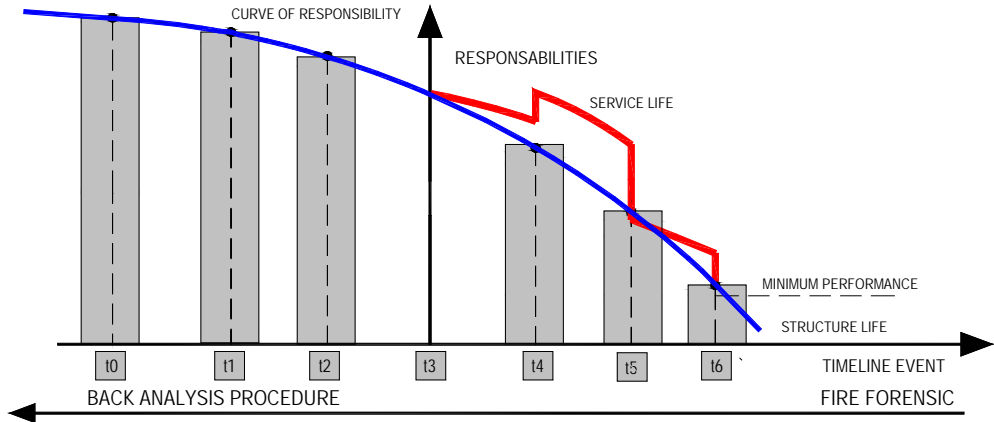


Figura 7. Profile of responsibility in the planning stage.

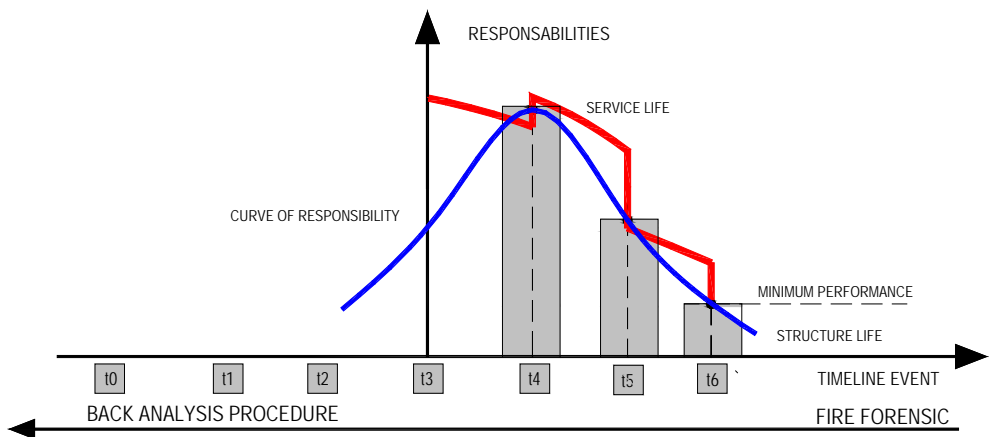


Figura 8. Profile of responsibility in the maintenance phase.

I profili di responsabilità sono sicuramente di ausilio all'autorità giudiziaria che deve identificare:

- la *culpa in vigilando* relativa alla responsabilità gestionale dell'opera;
- la *culpa in eligendo* riguardante le responsabilità connesse a quei comportamenti pericolosi che hanno portato all'aumento della probabilità del rischio incendio e alle cause scatenanti.

La definizione dei profili di responsabilità è un'attività particolarmente delicata di cui non si può non tenere conto.

4. STRUCTURAL FIRE INVESTIGATION AND FIRE ENGINEERING

La *Structural Fire Investigation*, inquadrata nell'ambito *forense*, permette di ricavare dati salienti trovando risvolti in diversi campi quali:

- **assicurativo**, per il riconoscimento in sede giudiziale del diritto ad ottenere il risarcimento di un danno al soggetto che ne lamenti gli effetti pregiudizievoli.
- **strutturale**, per gli interventi di riparazione, consolidamento strutturale o demolizione della struttura;
- **safety**, per le prime valutazioni di messa in sicurezza della struttura danneggiata.

La *Fire Investigation* si basa sulla conoscenza della dinamica della combustione nelle strutture basandosi sulla *semiotica degli incendi*, ossia su quella disciplina che studia i segni lasciati dal fuoco. Essa applica metodi di *reverse engineering* partendo dalla *Fire Safety Engineering* che è una multidisciplinaria atta a determinare la strategia di sicurezza per le strutture in caso di incendio e contiene, a cascata, al suo interno:

- *Fire Protection Engineering* che comprende tutte le protezioni, attive e passive, atte a fornire il livello di protezione soddisfacente per le strutture;
- *Fire Structural Engineering* che si occupa di aspetti specifici della protezione passiva dal fuoco in termini di analisi degli effetti termici degli incendi.

Il procedimento di *back analysis* si sviluppa quindi secondo i tre livelli gerarchici (figura 9) che vanno dagli aspetti strutturali, oggetto d'esame, sino a quelli relativi alla sicurezza.

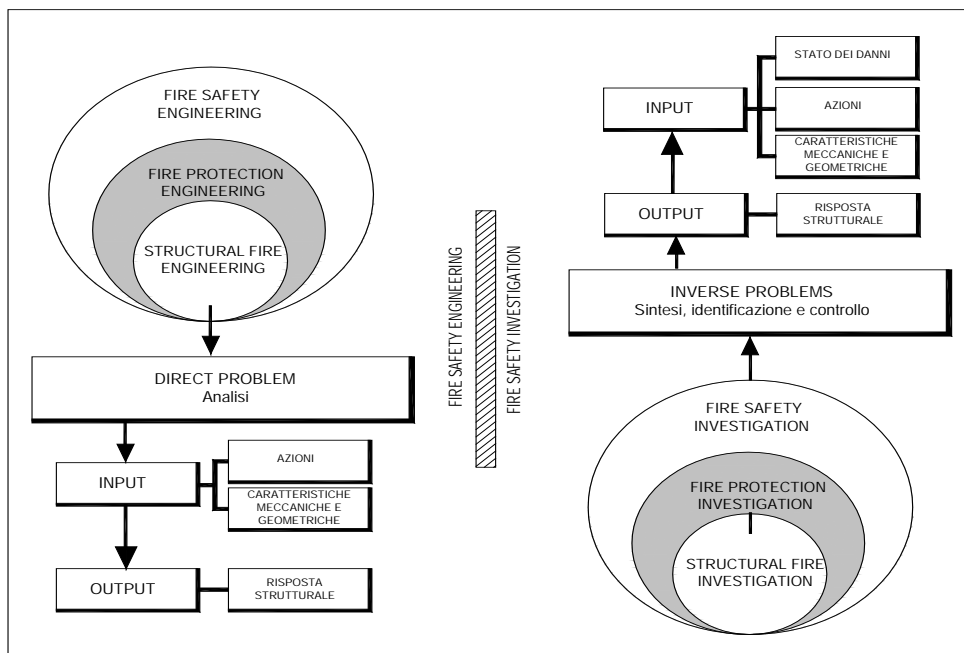


Figura 9. Duality: Structural Fire Investigation and Structural Fire Engineering.

La *Structural Fire Engineering* e la *Structural Fire Investigation* rappresentano le due facce della stessa medaglia, cioè sono due discipline incentrate su **metodologie** (*reverse engineering*) e **tecniche** (*back-analysis*) complementari avendo in comune gli **strumenti** (*software di simulazione e modellazione incendi, laser scanning, ecc*).

L'attività investigativa sulla struttura può essere condotta secondo più livelli, tenendo conto della natura del materiale:

- **analisi investigativa per singoli elementi** (*member behaviour*) ove vengono eseguite tutte le indagini preliminari al fine di ipotizzare dati salienti dell'attività investigativa in cui ogni elemento della struttura viene valutato considerandolo completamente separato dagli altri elementi;
- **indagini di parti della struttura** (*frame behaviour*) in cui una porzione strutturale è direttamente presa in considerazione nella valutazione usando appropriate condizioni al contorno;
- **analisi globale** (*whole building behaviour*) in cui tutta la struttura è presa in considerazione nella valutazione investigativa nel suo insieme.

Le analisi investigative possono quindi portare ad una scomposizione della struttura con l'ottenimento della diagnosi strutturale che concorre a dare una risposta al quesito peritale. Naturalmente come *spacchettare* la struttura dipende da numerose condizioni al contorno quali estensione dei danni repertati, tipologia costruttiva, estensione del compartimento, ecc. Risulta importante riportate nella perizia conclusiva le ragioni con cui si sono seguite le varie strade investigative tenendo conto delle cause, del riconoscimento dei guasti e delle diagnosi conseguenziali.

5. CONCLUSIONI

In questo contributo si sono riportati dei concetti generali della *Structural Fire Investigation* operante nell'ambito della *forensic engineering*.

L'identificazione del nesso eziologico è alla base dell'attività investigativa forense e tale risultato è più attendibile se l'analisi delle cause avviene in maniera corretta.

L'approccio dell'attività investigativa con le tecniche di *back-analysis* della *Structural Fire Engineering* permette di ricostruire la storia della struttura partendo dai danni e collassi causati dall'incendio.

Tale lavoro, se correttamente pianificato, porta ad identificare dei profili di responsabilità utili per dare risposte attendibili ai quesiti peritali.

L'attività di *Fire Investigation* nell'ingegneria strutturale diventa quindi una vera e propria disciplina progettuale per tutte quelle attività giudiziarie ove sono coinvolte strutture danneggiate e/o collassate per effetto di un incendio fornendo valutazioni salienti in ambito assicurativo e strutturale.

Le continue ricerche investigative, svolte nell'ottica della *reverse engineering*, porteranno a definire, in futuro, nuove frontiere, evolutive ed innovative, sia nell'ambito dell'ottimizzazione strutturale che della robustezza e fidatezza antincendio.

6. RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia per l'ausilio nella stesura del presente articolo:

- Lo *staff di ricerca* del Prof. Ing. Franco Bontempi docente presso il Dipartimento di Strutture e Geotecnica dell'Università *La Sapienza* di Roma;
- il personale del *Reparto Investigazioni Scientifiche* dell'Arma dei Carabinieri di Roma retto dal Col. Luigi Ripani.

BIBLIOGRAFIA

Arangio S., Bontempi F., Crosti C.: *Causal models for the forensic investigation of structural failures. Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation* – Zingoni. Taylor & Francis Group, London, Ed. 2013.

Augenti N., Chiaia B. M.: *Ingegneria Forense*, Dario Flaccovio Editore, Ed. 2011.

La Mendola S., Tesi di Dottorato: *Rischio di incendio ed affidabilità dei materiali strutturali*, relatore prof. G. Bonifazi, XXIII ciclo, Università *La Sapienza* Roma, A.A. 2010/2011.

Bontempi F.: *Robustezza strutturale*, convegno *IF CRASC'06*, Messina, aprile 2006.

Cafaro E.: *Quantificare la sicurezza: La modellazione degli eventi pericolosi tra Fire Engineering & Fire Investigation*, convegno 28 settembre 2006.

Mistretta P. S.: *L'ingegneria giuridica e forense nel settore antincendio*. EPC Rivista antincendio, febbraio 2014.

Ferraro A., Tesi di laurea: *“Metodologie di analisi avanzate e semplificate per la valutazione della sicurezza in caso di incendio di strutture intelaiate”*, relatore Prof. E. Nigro, Università degli studi di Napoli *Federico II*, A.A. 2006/2007.

NFPA 921: *Guide for Fire and Explosion Investigations*.

Tagliani E.: *Indagine tecnica per l'identificazione e la ricostruzione delle cause d'incendio*, Convegno AIAS Milano, ottobre 2010.