

## LE BASI DELLA PROGETTAZIONE STRUTTURALE ANTINCENDIO.

Franco Bontempi,

Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni nella Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università degli Studi di Roma La Sapienza, [franco.bontempi@uniroma1.it](mailto:franco.bontempi@uniroma1.it)

Chiara Crosti,

Ingegnere Strutturista, Dottore di Ricerca in Ingegneria Strutturale, Co-founder & CEO StroNGER s.r.l. [chiara.crosti@stronger2012.com](mailto:chiara.crosti@stronger2012.com)

### INTRODUZIONE

Il presente contributo presenta, anche se brevemente, quello che deve essere il quadro generale necessario per impostare correttamente e coerentemente la progettazione strutturale antincendio. Tale quadro, che può apparire all'inizio troppo ampio e distante, è essenziale invece, a parere degli autori, per comprendere i vari aspetti della sicurezza antincendio, che coinvolge inevitabilmente e intimamente persone – cose – impianti – strutture, e riflette, tra l'altro, l'esperienza di dieci anni di insegnamento del corso di Progettazione Strutturale Antincendio tenuto nella Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma La Sapienza.

#### 1. AZIONI ACCIDENTALI E ROBUSTEZZA STRUTTURALE

Il riconoscimento della natura specifica delle azioni accidentali e delle relative problematiche è relativamente recente [1]. Probabilmente, il punto di partenza è il clamoroso collasso del 16 maggio 1968 dell'edificio di 22 piani **Ronan Point** nella parte orientale di Londra [2]. Qui, a seguito di un'esplosione di gas al 18° piano, si ebbe il collasso di una parte rilevante dell'edificio costruito con l'assemblaggio di grandi pannelli prefabbricati (Fig.1). Questo evento ha permesso alla comunità scientifica e tecnica di riflettere su [3]:

1. il concetto di **robustezza strutturale**: una struttura ha questa proprietà se mostra un danno proporzionale alla causa che lo ha provocato; nel Ronan Point, una esplosione di intensità limitata ha provocato danni alla struttura sensibilmente estesi: il sistema con assemblaggio di grandi pannelli prefabbricati non è risultato in questo caso robusto;
2. il meccanismo di **collasso progressivo**: la rottura di un elemento si propaga all'interno della struttura in modo incontrollato, con una modalità che alle volte è denominata **domino**: nel Ronan Point, il collasso del solaio di un piano, ha provocato il collasso del piano sottostante e così via, fino ad arrivare alla perdita di tutti i solai sottostanti quello dell'appartamento dove è avvenuta l'esplosione;
3. l'**impossibilità di prevedere tutte le forme di danneggiamento** e quindi la necessità di prevedere forme di difesa, ovvero percorsi di carico, alternative e ridondanti; in termini generali, tali misure devono preservare la cosiddetta **integrità strutturale**;
4. l'importanza dei **dettagli costruttivi**, in quanto la propagazione del collasso poteva essere, se non evitata, limitata da specifici accorgimenti; questo riguarda in particolare la concezione e il dimensionamento delle connessioni fra i diversi elementi e le differenti parti strutturali.

Queste riflessioni si sono concretizzate dopo qualche mese nel 1970 in un pesante ripensamento normativo in Inghilterra, con l'introduzione di misure per rendere robuste le costruzioni. Infatti, il cosiddetto "fifth amendment" delle U.K. Building Regulations in 1970, recita:

*"[it] applies to all buildings over four stories and requires that under specified loading conditions a structure must remain stable with a reduced safety factor in the event of a defined structural member or portion thereof being removed. Limits of damage are laid down and if these would be exceeded by the removal of a particular member, that member must be designed to resist a pressure of 34 kN/m<sup>2</sup> (51 lb/in<sup>2</sup>) from any direction. Of special importance in relation to load bearing wall structures is that these conditions should be met in the event of a wall or section of a wall being removed, subject to a maximum length of 2.25 times the story height".*



Figura 1 – Collasso Roman Point (<http://www.failedarchitecture.com/the-downfall-of-british-modernist-architecture/>)

È interessante notare che nel corso di circa venti anni, la definizione di robustezza strutturale si è allargata includendo - accanto ad azioni accidentali quali fuoco, esplosioni e impatti - anche gli effetti legati all'**errore umano** [4]. Infatti, nelle basi degli Eurocodici negli Anni '90, si trova la definizione:

*"Robustness is the ability of a structure to withstand events like fire, explosions, impact or the consequences of human error, without being damaged to an extent disproportionate to the original cause."*

Inoltre, vale la pena sottolineare che la robustezza strutturale richiede, dal punto di vista **intensivo**, una perdita di capacità portante che sia regolare e proporzionale alla causa, mentre, dal punto di vista **estensivo**, una limitata diffusione del danno nella struttura.

In Italia, dal punto di vista normativo, solo nel 2005, nel cosiddetto Testo Unico delle Norme Tecniche delle Costruzioni di cui al D.M. 14 settembre 2005, per la prima volta nel Capitolo 2 – Sicurezza, Prestazioni attese, Azioni sulle costruzioni, è stato introdotto il concetto di **robustezza** e, contemporaneamente, nel Capitolo 3, le **azioni accidentali**.

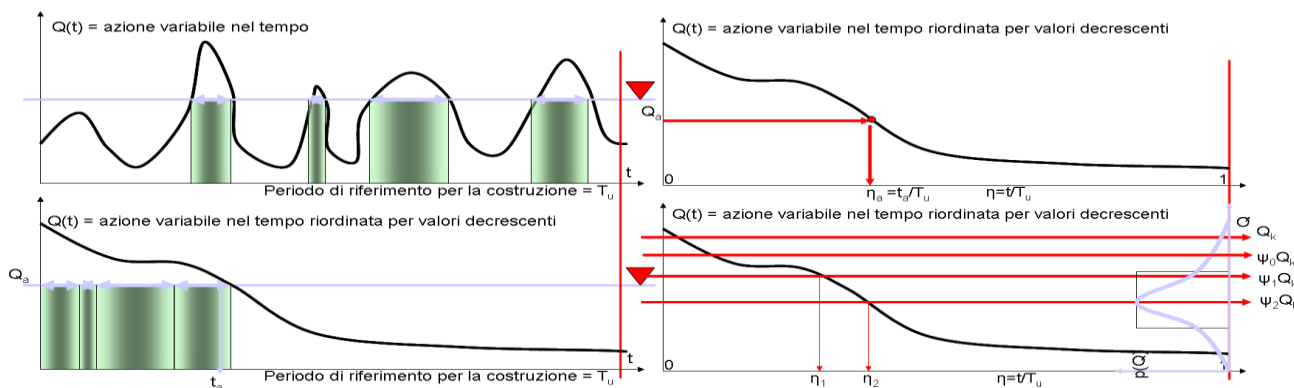
Successivamente, tali concetti sono stati ripresentati nelle Norme Tecniche delle Costruzioni del 2008, in cui le *azioni accidentali* sono state rinominate *azioni eccezionali*. Questo cambio letterale, dovuto al fatto di voler evitare ambiguità con la consuetudine italiana per la quale i carichi accidentali erano i carichi non permanenti che possono gravare su di una struttura (per es., per un ponte, il carico dovuto al transito dei pedoni e dei veicoli, mentre è permanente il carico relativo al peso proprio del ponte), denota una certa improprietà nei concetti. Infatti, il termine eccezionale dovrebbe denotare una situazione in cui una azione si presenta con un valore inusuale (ad es. una precipitazione nevosa di un metro in Sicilia), mentre l'aggettivo accidentale dovrebbe riferirsi ad una situazione che avviene per incidente o casualmente (l'incendio di una autocisterna): il termine eccezionale dovrebbe fare, quindi, riferimento all'**intensità dell'azione**, mentre il termine accidentale al suo **meccanismo**. Occorre anche riflettere che, mentre la nevicata di un metro in Sicilia in effetti è statisticamente improbabile (**outlier**), l'incendio di un'autocisterna è più frequente, ma avviene con modalità uniche.

In effetti, questa riflessione può essere approfondita considerando la Fig.2: qui è considerato come può essere analizzata una azione di cui esista una base statistica. Questo può essere il caso di azioni ambientali - come vento, neve, variazioni termiche fino ad arrivare al sisma – o antropiche – come il carico negli edifici per le varie destinazioni d'uso. L'eccezionalità si riferisce dunque ad un valore estremo di questa statistica. Il caso di azioni come l'incendio, che presentano meccanismi di sviluppo specifici, non può essere al contrario trattato in questo modo.

È proprio la mancanza di una base statistica che distingue le azioni accidentali come l'incendio: in effetti, la dinamica di tali eventi si presenta sempre con specifiche caratteristiche di singolarità e unicità.

Su questo punto, in letteratura si trovano distinte due categorie di eventi che possono interessare le strutture:

1. **eventi HP-LC** (High Probability – Low Consequences), ovvero situazioni che si presentano ripetutamente sulle costruzioni e che, normalmente, hanno basse conseguenze;
2. **eventi LP – HC** (Low Probability – High Consequences), situazioni al contrario che si presentano raramente ma che possono avere gravi conseguenze.



**Figura 2 – Analisi statistica di una azione variabile nel tempo.**

La Tab.1, sintetizza a grandi linee le peculiarità delle due categorie di eventi:

- le prime tre righe considerano le quantità di energia, rotture e persone che possono essere coinvolte;
- le successive tre righe descrivono le problematiche in termini di analisi dell’evento;
- le ultime due, fanno riferimento alla facilità o difficoltà di previsione della dinamica dell’evento.

Proprio l’intrinseca natura degli eventi LP – HC, può condurre a sviluppi con effetti a cascata, in cui catene di circostanze si susseguono in modo imprevedibile, dando luogo alla cosiddetta situazione di **run-away** come illustrata in Fig.3: l’effetto dell’azione esce dai limiti del quadro di prevedibilità. È proprio questa caratteristica, questa possibile escalation dell’evento che può portare a situazioni catastrofiche.

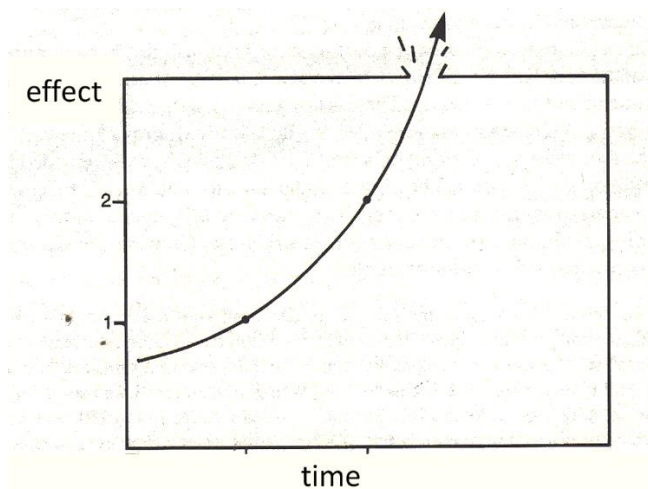
**Tabella 1 – Caratteristiche principali degli eventi HP – LC e LP – HC.**

Eventi	HP - LC	LP - HC
Rilascio di energia	Basso	Alto
Numero di rotture	Basso	Alto
Numero di persone coinvolte	Basso	Alto
Comportamento strutturale	Lineare	Non lineare
Interazioni	Lasche	Strette
Incertezza	Bassa	Elevata
Scomponibilità dell’evento	Alta	Bassa
Prevedibilità dell’evento	Alta	Bassa

In questa considerazione di eventi impreveduti e effetti imprevedibili, si è aggiunto recentemente il tema dei cosiddetti **Black-Swan Events** [5]. Questi eventi sono caratterizzati:

- I. dall'essere **eventi singolari**, al di fuori della normale aspettativa in quanto nulla della passata esperienza ha prefigurato la loro possibilità;
- II. dall'averne un **impatto estremo**;
- III. dall'essere, a dispetto della loro non previsione e inatteso accadimento, una volta avvenuti, **retrospettivamente spiegabili e prevedibili**.

È quest'ultima affermazione, che porta a pesanti cambiamenti nella comunità scientifica e tecnica, come quello avvenuto a seguito dell'attentato al World Trade Center del Settembre 2001.



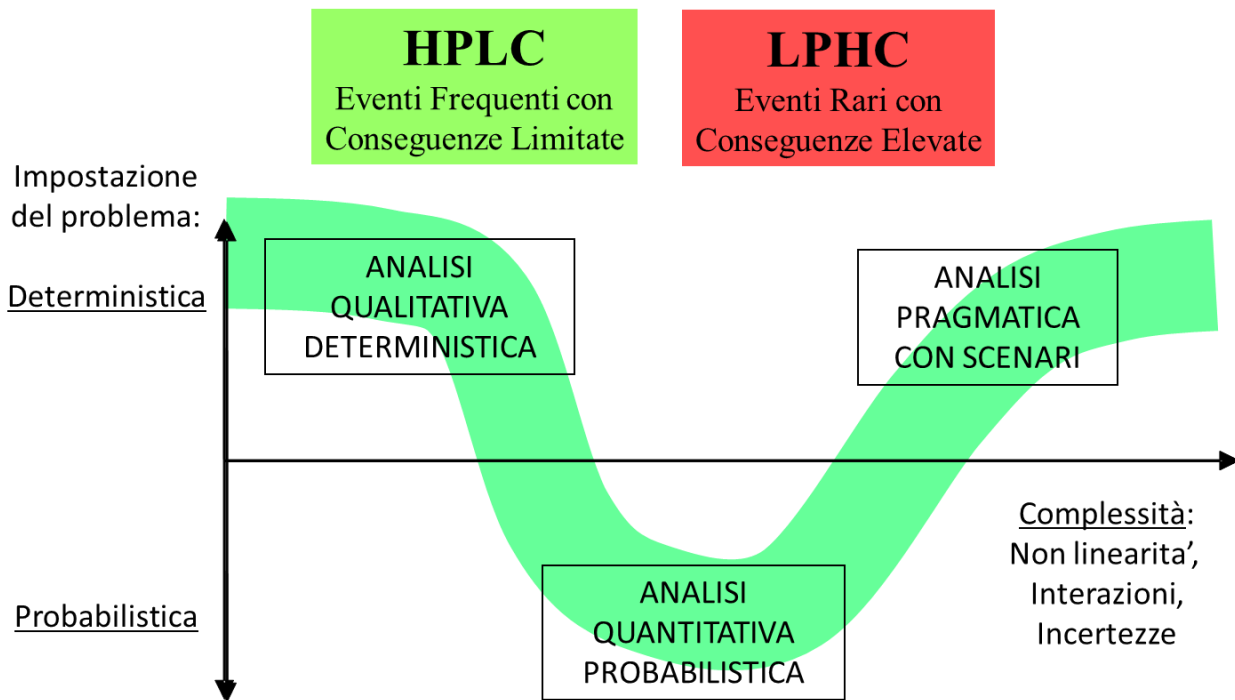
**Figura 3 – Run-away nel tempo in caso di evento LP - HC.**

Con tutto ciò indicato, appare evidente che l'impostazione dell'analisi strutturale e delle conseguenti verifiche di sicurezza di costruzioni in caso di azioni accidentali, prima fra tutte l'incendio, non possano essere compiutamente eseguite con impostazioni analoghe ai casi di azioni legate al normale utilizzo o alle normali condizioni ambientali e naturali.

In particolare, è necessario superare il tradizionale concetto di combinazione dei carichi, per arrivare ad una definizione diversa di contesto in cui una situazione è soggetta ad azioni diverse. Si deve infatti riflettere su quanto illustrato in Fig.4:

1. lungo l'asse orizzontale è riportata in maniera ideale la **complessità del problema**, che cresce in funzione delle incertezze, delle non linearità e delle interazioni presenti (come da Tab. 1);
2. lungo l'asse verticale sono posizionati i due possibili approcci – **deterministico / probabilistico** - per l'impostazione e la soluzione del problema strutturale.

È evidente come, mentre nei casi più semplici si possano avere impostazioni deterministiche (anche semplicemente qualitative), si passa poi a situazioni in cui l'approccio probabilistico sia capace di mettere in evidenza risultati più ricchi. Al crescere però della complessità (ovvero non linearità – interazioni – incertezze), in particolare anche per la mancanza di basi statistiche, è necessario ricorrere ad un approccio pragmatico, con assunzione deterministica dei vari parametri del problema.



**Figura 4 – Differenti impostazioni dell’analisi strutturale e delle verifiche di sicurezza al crescere della complessità del problema.**

Sempre nel D.M. 14 settembre 2005, è comparsa per la prima volta nel quadro normativo italiano la definizione di scenario: in particolare, il punto 2.6.5. COMBINAZIONI DELLE AZIONI E SCENARI DI CONTINGENZA prevedeva:

*Il Progettista, a seguito della classificazione e della caratterizzazione delle azioni, deve individuare le possibili situazioni contingenti in cui le azioni possono cimentare l’opera stessa.*

*A tal fine, è definito:*

- lo **scenario**: un insieme organizzato e realistico di situazioni in cui l’opera potrà trovarsi durante la vita utile di progetto;
- lo **scenario di carico**: un insieme organizzato e realistico di azioni che cimentano la struttura;
- lo **scenario di contingenza**: l’identificazione di uno stato plausibile e coerente per l’opera, in cui un insieme di azioni (scenario di carico) è applicato su una configurazione strutturale.

*Per ciascuno stato limite considerato devono essere individuati scenari di carico (ovvero insiemi organizzati e coerenti nello spazio e nel tempo di azioni) che rappresentino le combinazioni delle azioni realisticamente possibili e verosimilmente più restrittive.*

In particolare, nel caso di incendio ma non solo, è rilevante lo scenario di contingenza, che considera le diverse configurazioni in cui una costruzione può trovarsi: si devono quindi tenere presenti situazioni transitorie, come quelle legate alla manutenzione straordinaria, ovvero quelle in cui parte

dei sistemi impiantistici (ad esempio rilevazione e spegnimento) sono parzialmente o totalmente inefficienti. È esperienza comune che proprio le situazioni transitorie sono quelle che più frequentemente favoriscono l'evento incendio.

Inoltre, dovrebbe essere data attenzione anche a scenari di azioni accidentali concatenate (es. sisma -> esplosione -> incendio, ovvero impatto -> incendio, dalle norme europee e italiane non preventivati, ma realmente successi [6]).

La Fig. 5, tratta dal Technical Report ISO 13387 sulla **Fire Safety Engineering** [7], evidenzia gli aspetti operativi della definizione degli scenari nel caso di incendio: si vede qui come, in funzione di differenti fattori, il numero degli scenari possibili cresca combinatorialmente. In effetti, è dunque necessaria una precisa valutazione sulla plausibilità e sulla rappresentatività di questi scenari, al fine di selezionarne un campione limitato.

Da queste considerazioni, non si può non apprezzare la maggior difficoltà nell'impostazione delle analisi e delle verifiche in presenza di azioni accidentali, rispetto alle altre condizioni: senza entrare in dettaglio, il complesso delle problematiche e dei termini attualmente in uso in questo settore dell'Ingegneria Strutturale, sono riassunti nel *word cloud* di Fig. 6.

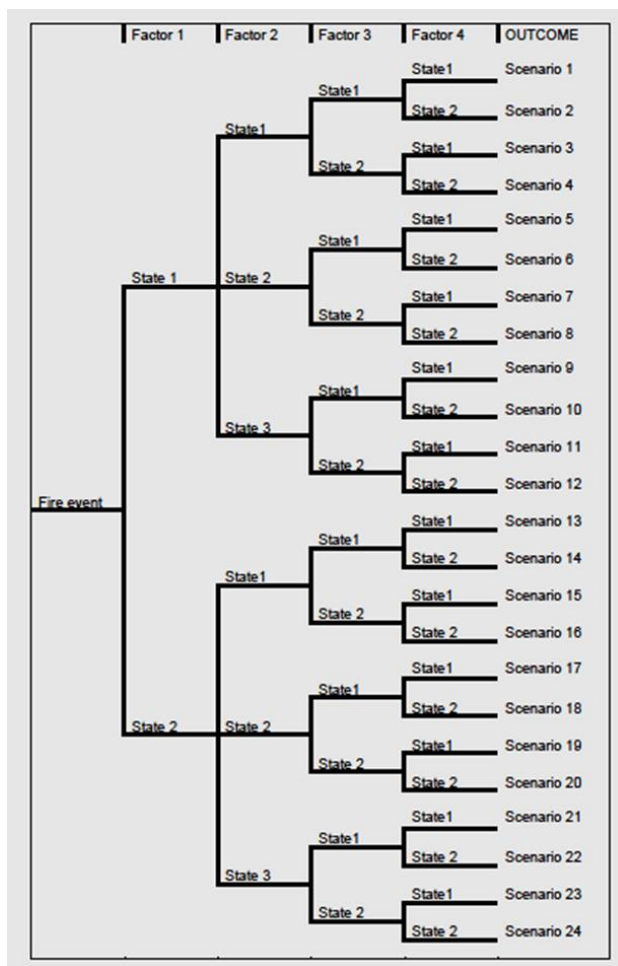


Figura 5 – Definizione degli scenari in caso di incendio secondo ISO 13387.





la transizione di queste celle dagli stati **incombusto** → **incipiente incendio** → **crescita incendio** → **incendio completamente sviluppato** → **decadimento incendio** → **materiale completamente combusto**. In questo modo, ad istanti discreti si può aggiornare lo stato di tutte le celle, e seguire la diffusione del processo tenendo conto sia di eventuali barriere che ostacolano la diffusione, sia di contingenze che la favoriscono.

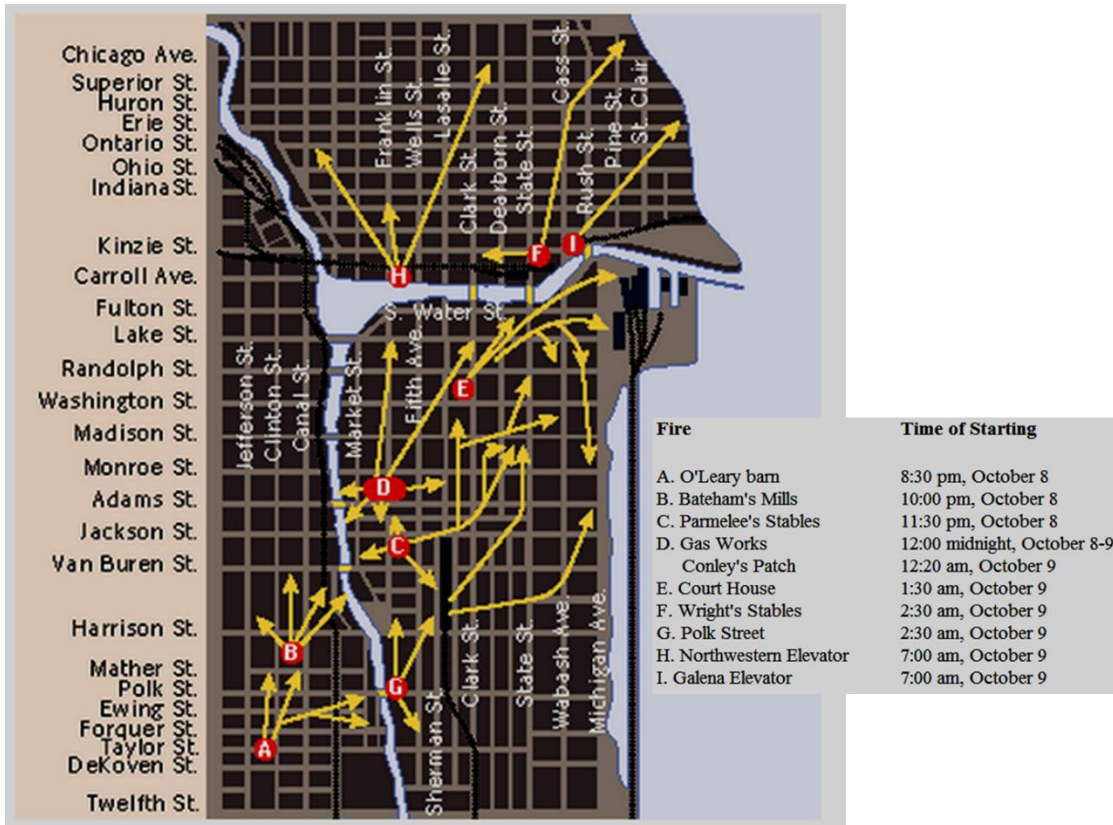


Figura 7 – Diffusione del grande incendio avvenuto fra il 7 e il 10 ottobre del 1871 a Chicago [8].

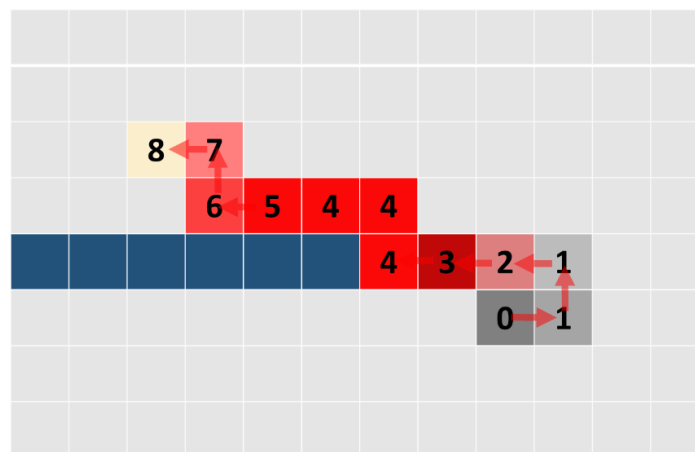


Figura 8 – Algoritmo di diffusione spaziale dell'incendio con automi cellulari (grigio scuro=incendio estinto, grigio=fase di decadimento incendio, rosso scuro= incendio completamente sviluppato, rosso=incendio in crescita, giallo=fase di incipiente incendio, blu=barriera spaziale all'incendio).

Passando al livello di edificio, una rappresentazione estremamente efficace della dinamica diffusiva di un incendio si trova nello studio realizzato dal giapponese National Institute for Land and Infrastructure Management a seguito dell'incendio dell'Hotel Windsor a Madrid, avvenuto il 12 febbraio 2005 [9].

La Fig. 9 estratta da tale report sintetizza l'evoluzione dell'incendio riportando in verticale i piani dell'edificio e in orizzontale il tempo in ore [9]. Con delle convenzioni analoghe a quelle della Fig.8, si può seguire come l'incendio dal 21 piano si sia propagato inizialmente verso l'alto, per poi ridiscendere in basso: in arancione sono evidenti le zone con incendio in fase di crescita, in rosso le parti con incendio completamente sviluppato mentre in grigio le parti dove tutto il combustibile si è esaurito. Sono anche indicati le varie fasi di danneggiamento strutturale associate all'evoluzione dell'incendio, a ricordare le interazioni fra sviluppo dell'azione e della risposta strutturale. In particolare, anche con riferimento alla Fig. 10, appare come il collasso progressivo dei piani superiori al piano tecnico T2 sia stato arrestato proprio dalla presenza dei rinforzi strutturali connessi a questo piano. Questo piano tecnico, ha evidentemente compartimentato strutturalmente l'edificio, provocando l'arresto della propagazione del danno catastrofico, conferendo così di fatto robustezza all'edificio.

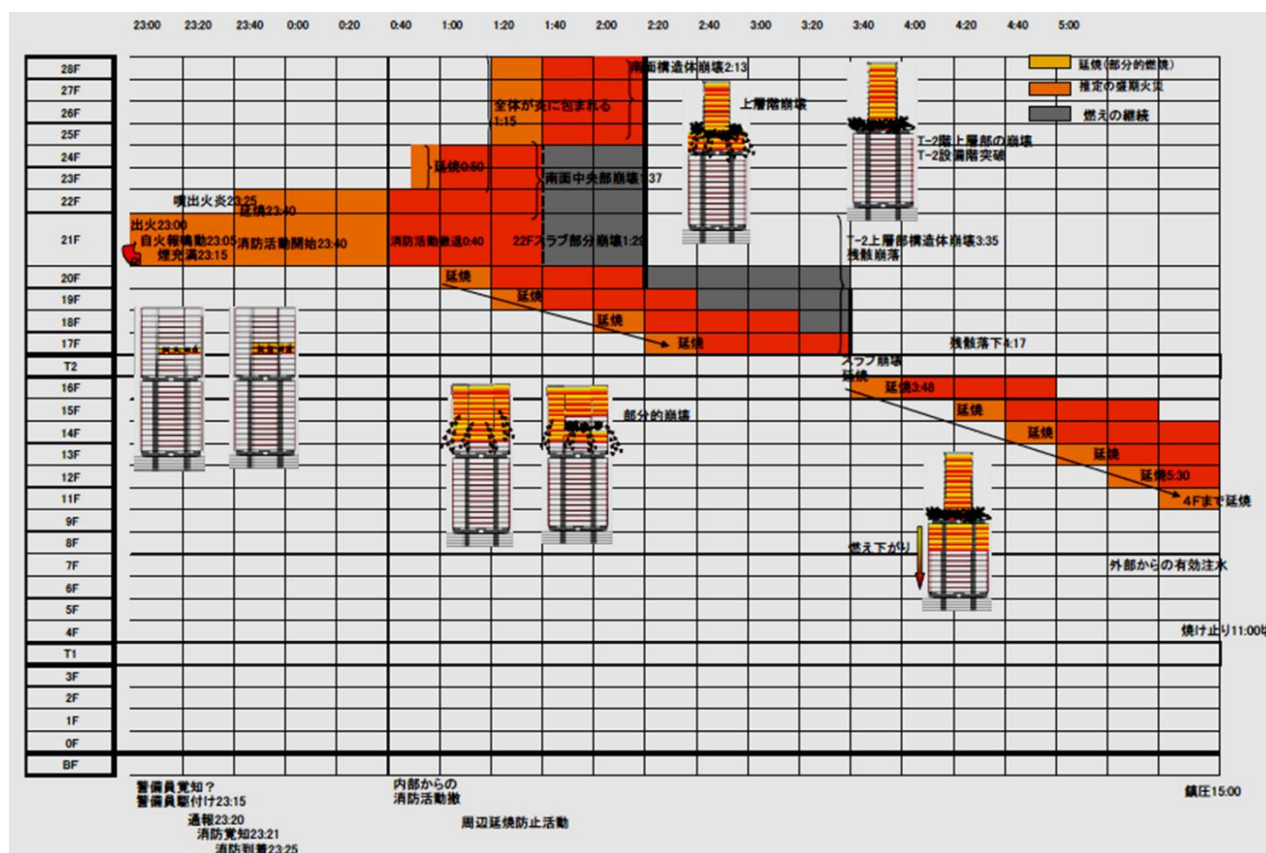


Figura 9 – Schema della dinamica diffusiva dell'incendio dell'Hotel Windsor a Madrid [9].



**Figura 10 – Arresto del collasso progressivo dei piani superiori dell’Hotel Windsor a Madrid per la presenza di un irrobustimento legato ad un piano tecnico [8].**

### **Carattere intensivo dell’incendio**

L’andamento nel tempo dell’intensità dell’incendio può essere sintetizzato dall’energia termica rilasciata nel tempo - **curva HRR / Heat Release Rate** – o, con una rappresentazione meno inclusiva ma più immediata, da come varia la temperatura nell’ambiente soggetto all’incendio – **curva temperatura / tempo  $T(t)$**  - come rappresentato in Fig.11. Questa illustrazione presenta in alto l’andamento intensivo - nel tempo - di un incendio, caratterizzato dalle seguenti fasi:

1. **incipiente sviluppo** dell'incendio nel compartimento in oggetto ovvero fase preliminare di innesco;
2. **crescita dell'incendio**, fino alla fase flashover ovvero al completo coinvolgimento del combustibile presente nel compartimento;
3. **incendio completamente sviluppato**, governato dalla quantità di combustibile presente o dalla quantità di ossigeno disponibile;
4. **decadimento dell'incendio fino allo spegnimento**, all'esaurimento del combustibile o dell'ossigeno.

Accanto allo sviluppo temporale dell'incendio, nella Fig.11 sono evidenziate le varie strategie di controllo dell'azione. Ordinatamente, si hanno dunque:

1. **prevenzione** dell'accadimento dell'incendio: limitazione delle sorgenti di innesco, dei comportamenti umani pericolosi, introduzione di procedure di emergenza e misure di evacuazione;
2. contrasto attivo dell'incendio attraverso l'uso di energia o l'intervento umano, ovvero **protezione attiva**: misure di individuazione di fumi, calore, fiamme; misure di soppressione dell'incendio, automatiche come sprinkler e manuali come estintori e squadre apposite; sistemi di evacuazione di fumo e calore;
3. contrasto passivo dell'incendio, attraverso caratteristiche intrinseche della costruzione - sua configurazione, suoi materiali, suo contenuto - ovvero attraverso **protezione passiva**: compartimentazione, controllo del danno e della perdita di funzionalità;
4. contrasto della propagazione indiscriminata delle conseguenze dell'incendio (sia all'interno della costruzione sia all'esterno, a costruzioni circostanti e all'ambiente): **robustezza**.

Lo schema logico della sicurezza antincendio è illustrato nella parte inferiore della stessa Fig. 11: in questa parte della figura, lo sviluppo nel suo complesso dell'incendio è contrastato da differenti gate logici, che rappresentano diversi layer di salvaguardia della vita umana, dei beni, della costruzione e dell'ambiente. La presenza di queste linee di difesa, differenti per natura, deve far comprendere che si sta passando dal vedere una costruzione come una struttura fissa e inerte a un sistema in cui parti fisse – impianti – persone cooperano per la sicurezza anti incendio, arrivando quindi al concetto di sistema strutturale.

È questa visione che appare la più completa e coerente per ottenere la sicurezza in caso di un'azione accidentale complessa come l'incendio, conducendo alla cosiddetta **Fire Safety Engineering** (FSE, o in italiano Ingegneria della Sicurezza Antincendio) che è una multi-disciplina basata sull'applicazione dei principi della scienza e dell'ingegneria agli effetti dell'incendio, attraverso cui la stabilità strutturale ed il controllo della propagazione dell'incendio sono ottenuti mediante l'individuazione di adeguate misure di protezione e prevenzione. La FSE richiede, tra l'altro, la scelta del livello di prestazione, la definizione degli scenari di incendio di progetto, la scelta dei modelli di incendio e l'analisi termomeccanica con modelli di calcolo avanzati [6, 12].

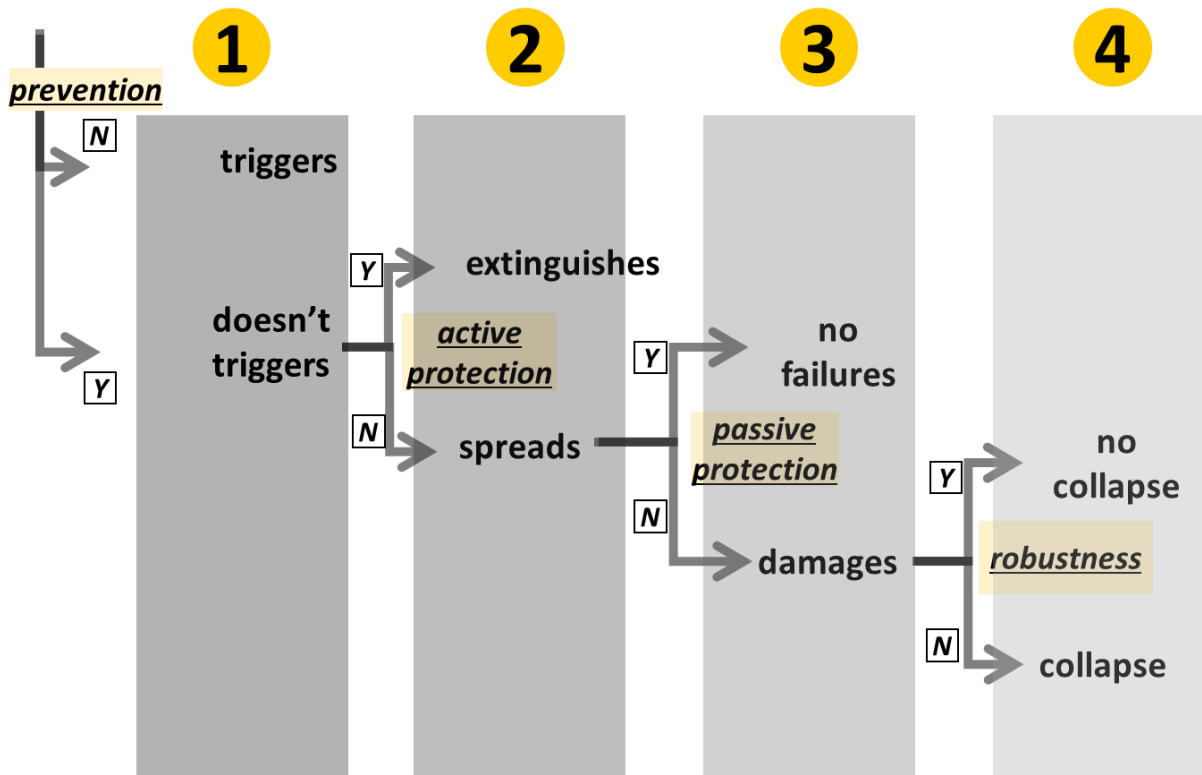
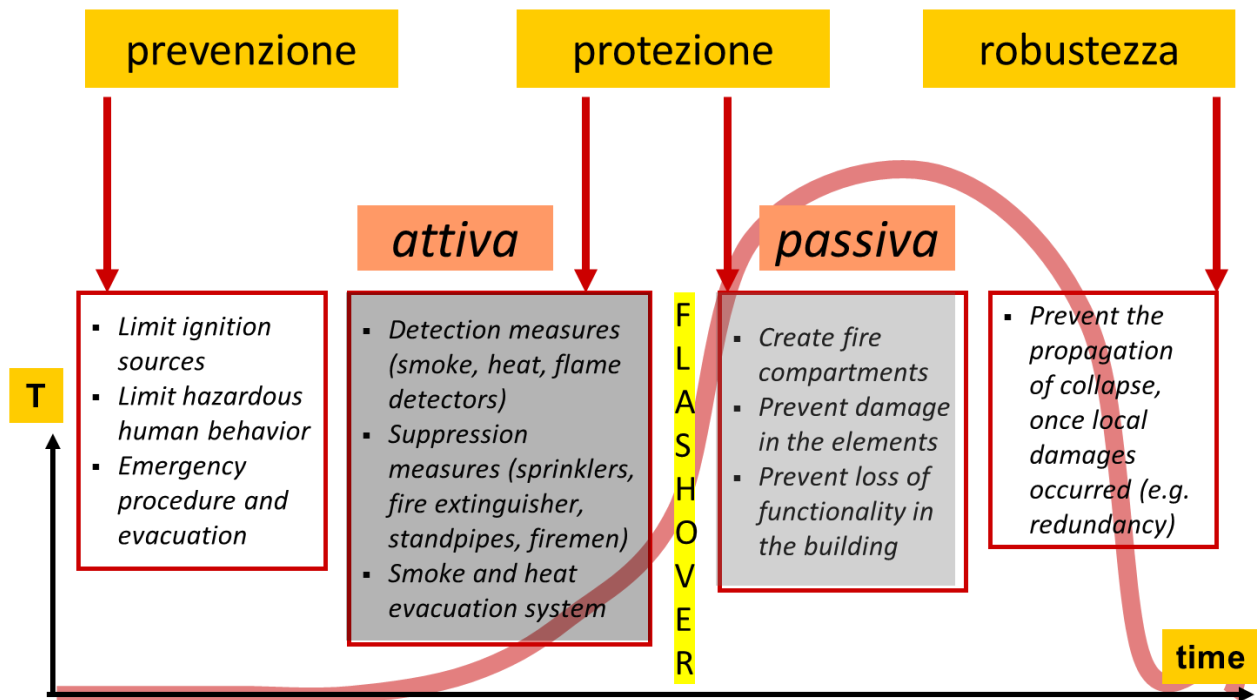
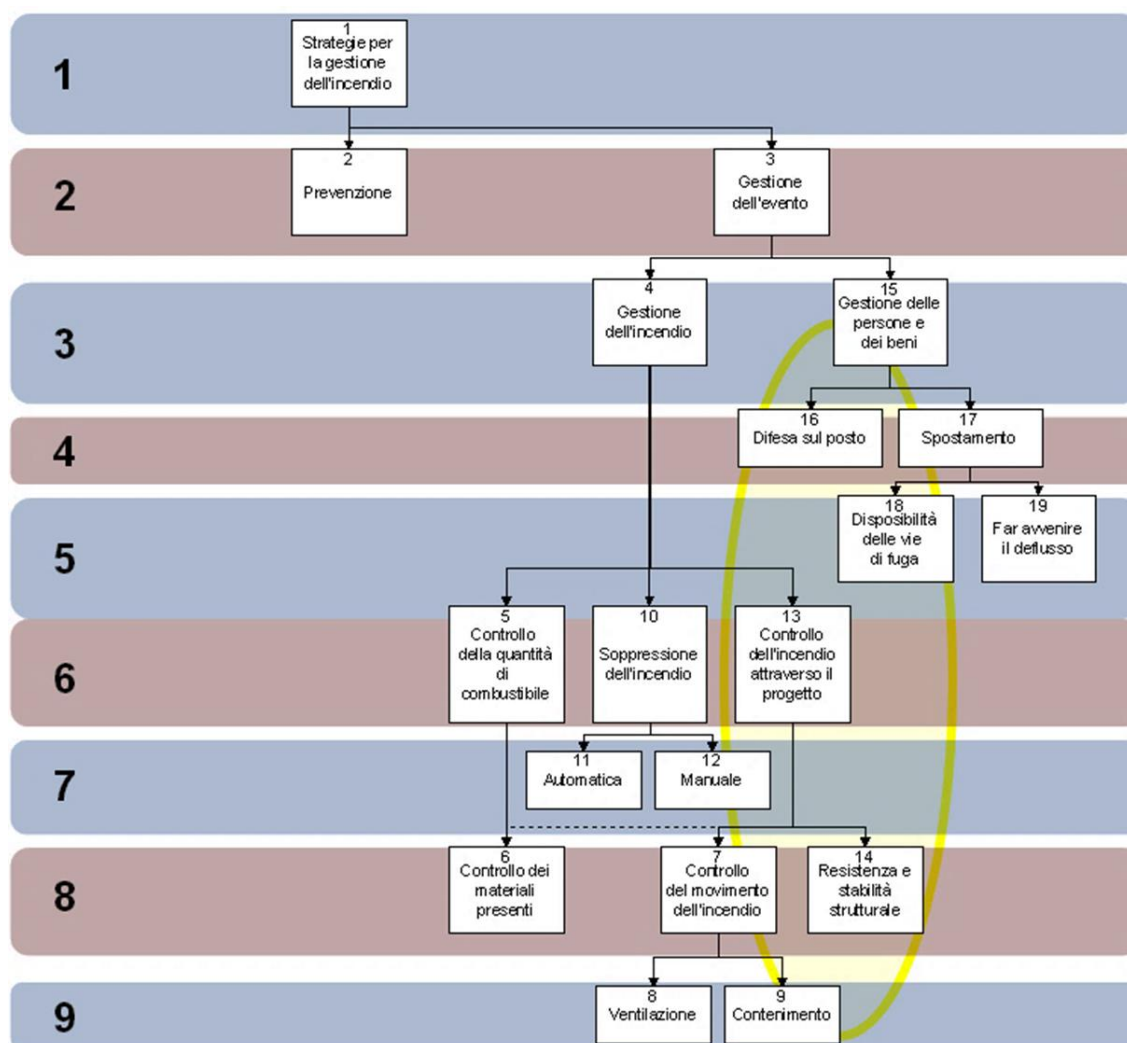


Figura 11 – Andamento intensivo dell'incendio (HRR o temperature) in funzione del tempo e differenti strategie antincendio: prevenzione, protezione attiva e passiva, robustezza.

### 3. PRESUPPOSTI ALLA SICUREZZA ANTINCENDIO

Una declinazione più semplice delle strategie per contrastare l'incendio è sintetizzata in Fig.12. È evidente in questo schema come il contrasto dell'incendio avviene secondo un ben preciso schema logico, fatto di layer difensivi successivi come anticipato dalla Fig.11. È proprio questa organizzazione complessiva la sola che può garantire una sostanziale garanzia contro questa azione accidentale. In particolare, il nucleo tradizionale della progettazione strutturale antincendio è evidenziata dall'ellisse gialla, ma deve essere estesa e resa coerente con tutto il resto [13].



**Figura 12 – Andamento intensivo dell'incendio (HRR o temperature) in funzione del tempo e differenti strategie antincendio: prevenzione, protezione attiva e passiva, robustezza.**

Esattamente come l'evento incendio e i suoi effetti sono contrastati dai layer difensivi visti precedentemente, il pericolo incendio si concretizza in un evento quando questi layer sono perforati.

Infatti, in termini generali, il modello che governa l'accadimento di situazioni accidentali è quello di Reason – **Swiss Cheese Model**. La Fig. 13 schematizza questo modello: Reason immagina un sistema realizzato per proteggere dai pericoli come costituito da più strati difensivi, di natura differente ovvero legata a persone – materiali – impianti, che, purtroppo inevitabilmente, presentano dei punti di debolezza o delle falle. Secondo Reason, quando queste debolezze si allineano, ovvero sono presenti contemporaneamente ed efficacemente, il pericolo si concretizza in un accidente [14].

La contestualizzazione di questo modello generale al caso specifico delle costruzioni soggette al pericolo di incendio, si trova nello schema di Fig.14. Qui i vari strati difensivi possono essere ordinati come pertinenti:

- A. alle caratteristiche intrinseche della costruzione (aspetti passivi, come concezione strutturale, topologia e geometria dell'edificio, materiali e componenti utilizzati);
- B. alle caratteristiche attive della costruzione come sistema (sistemi di identificazione e soppressione dell'incendio, organizzazione del personale, ...);
- C. alle caratteristiche di utilizzo della costruzione (manutenzione e destinazione d'uso).

Quando debolezze in questi strati si allineano, la sicurezza del sistema è perforato e si verifica l'evento accidentale incendio [15].

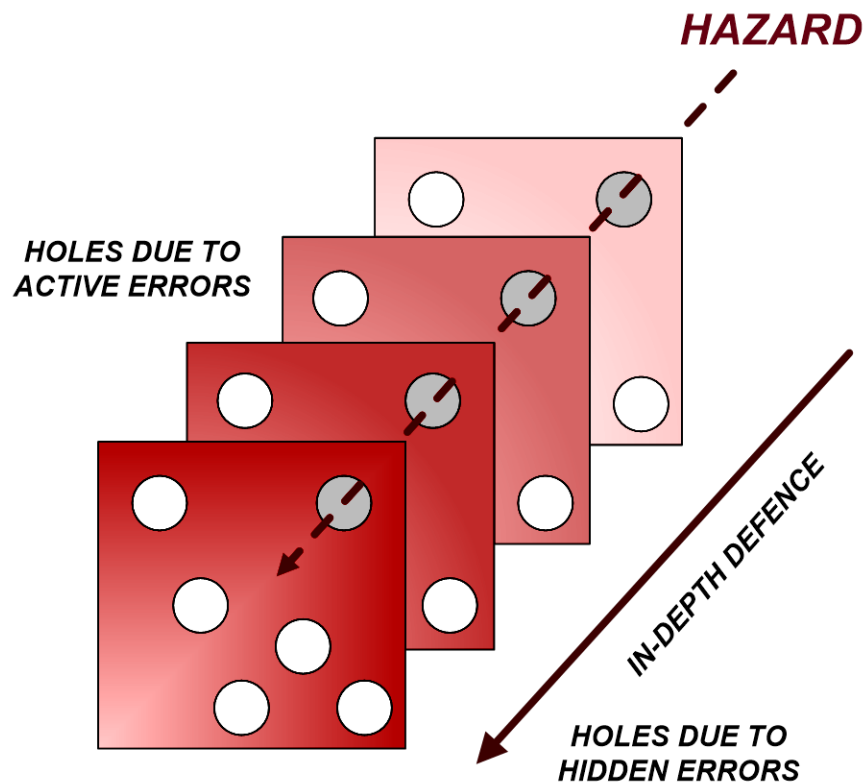


Figura 13 – Modello generale di Reason per la concretizzazione di un incidente in un sistema [14].

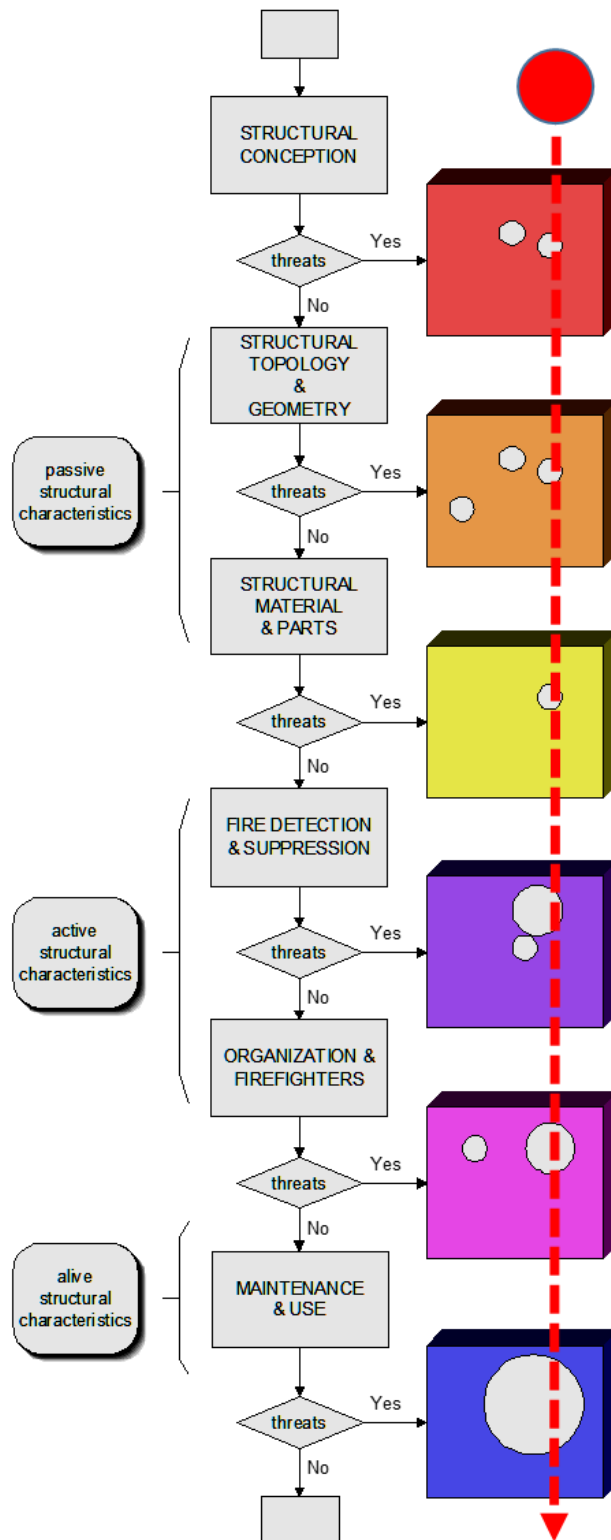


Figura 14 – Applicazione del modello generale di Reason alla sicurezza antincendio: i punti di debolezza delle varie linee difensive si allineano e il pericolo ipotetico di incendio si concretizza in un evento reale [15].



#### 4. IMPOSTAZIONE DELLA PROGETTAZIONE STRUTTURALE ANTINCENDIO

L'incendio nella sua natura accidentale è grave di conseguenze e una progettazione strutturale che ne tenga conto è complessa. Un quadro generale della progettazione in caso di incendio si ha considerando la Fig.15, tratta dal citato report ISO 13387 [7]. Si hanno, metaforicamente riuniti intorno ad un tavolo (**BUS INFORMATION**), da un lato, soggetti:

- portatori di interessi relativi all'utilizzo della costruzione (**DESIGN**): accanto ad aspetti alla base del problema di progetto (0), ci sono parametri di progetto – legati ad esempio alla destinazione d'uso - che non possono essere alterati a pena di snaturare il progetto in esame (SS0a) mentre altri dati – ad esempio legati ai materiali presenti - possono essere consapevolmente cambiati (SS0b);
- esperti nella definizione dell'azione incendio (**ACTION**), ovvero esperti nella individuazione della sorgente di innesco e nello sviluppo intensivo dell'incendio (SS1) oltre ad esperti nello sviluppo estensivo dell'incendio (SS2);
- esperti nella valutazione della risposta (**RESPONSE**) passiva (SS3) ed attiva (SS4) del sistema strutturale.

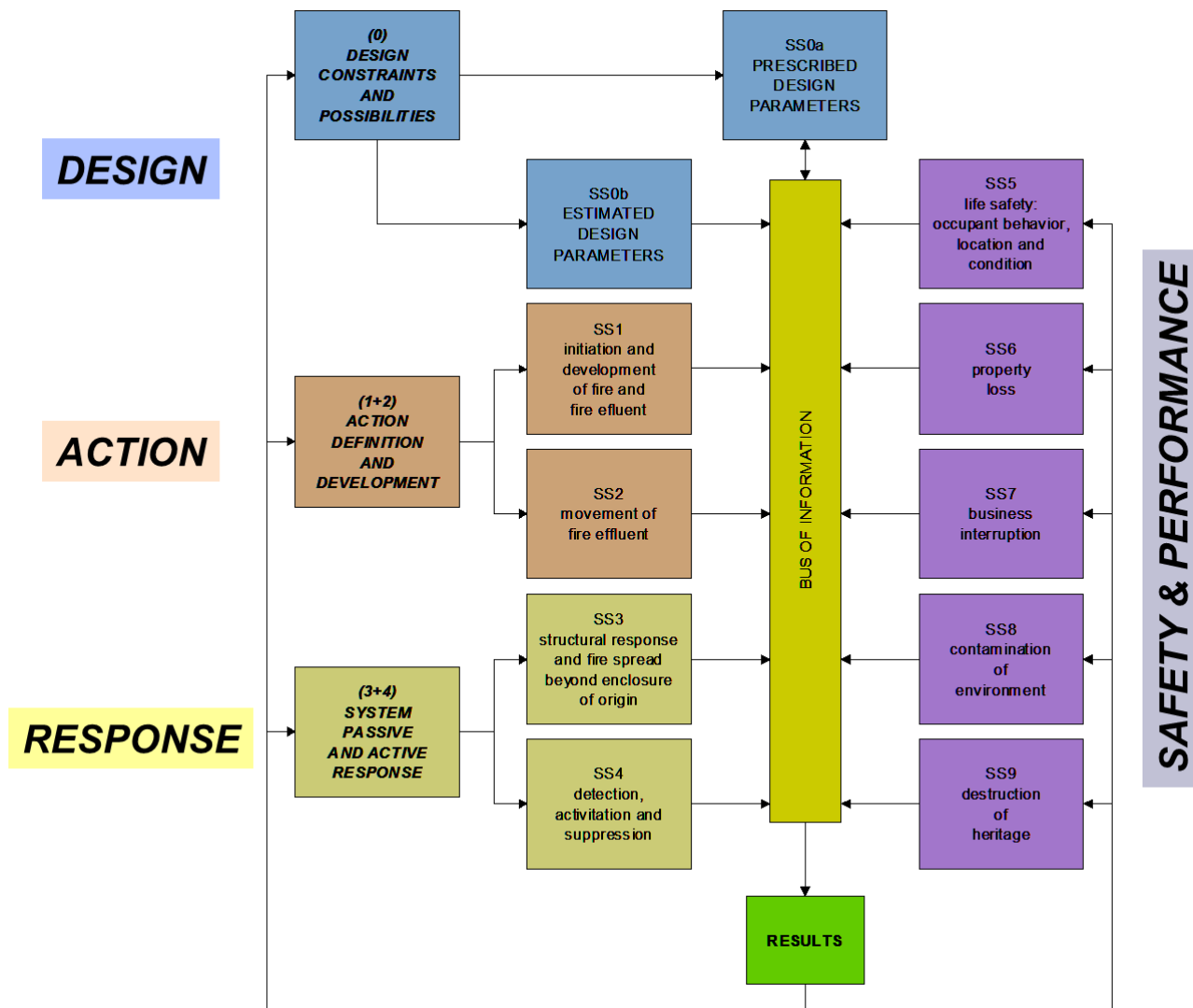
Su questo lato, si trovano quindi i propositori del progetto e quelli che ne valutano la risposta a seguito dell'individuazione delle caratteristiche dell'incendio.

Dall'altro lato, in termini immaginari, si trovano i soggetti tenuti a valutare la sicurezza e le prestazioni di quanto progettato (**SAFETY & PERFORMANCE**), ovvero in ordine, chi si occupa della salvaguardia:

- della vita umana (SS5);
- dei beni (SS6);
- della interruzione di funzionalità (SS7);
- della contaminazione dell'ambiente (SS8);
- della perdita della eredità culturale e storica (SS9).

Sull'ideale tavolo comune (BUS INFORMATION) sono confrontate le differenti istanze e in base ai risultati si può iterativamente migliorare la soluzione progettuale corrente fino ad arrivare, sperabilmente, ad una soluzione soddisfacente se non ottima del progetto.

Tale quadro teorico, permette di evidenziare la natura multidisciplinare della progettazione strutturale antincendio: si confrontano, infatti, competenze differenti come, tra le altre, l'architettura compositiva, l'ingegneria strutturale vera e propria, gli aspetti della combustione, la fluidodinamica numerica per la simulazione della propagazione dell'incendio, gli aspetti termodinamici di propagazione del calore all'interno delle parti strutturali, gli aspetti legati al comportamento fisiologico e psicologico delle persone.



**Figura 15 – Tavolo immaginario di discussione del progetto antincendio (adattato da [7]).**

In questa visione generale della progettazione per la sicurezza in caso di incendio, trovano coerentemente posto tutte le possibili alternative che possono andare da soluzioni prescrittive a soluzioni prestazionali. La Fig.16 sintetizza questi due estremi [15]:

- nell’approccio prescrittivo, devono essere seguite delle regole date, precise e conclusive, che incapsulano implicitamente il raggiungimento degli obiettivi della sicurezza; in particolare, sono indicati e fissati gli elementi costituenti il progetto – metodi, formule, parametri, materiali, componenti, parti, impianti - che possono essere impiegati nella realizzazione della costruzione;
- nell’approccio prestazionale, viceversa, sono fissati esplicitamente gli obiettivi da raggiungere ai fini della sicurezza e possono essere conseguentemente scelti le teorie, i metodi, i materiali, i componenti e gli impianti che ne assicurano il raggiungimento.

Come noto, i due approcci hanno pregi e svantaggi che risultano in gran parte duali:

- l'approccio prescrittivo è più semplice come applicazione e risulta adatto per casi semplici, risultando più automatico; per contro risulta rigido, di difficile o anche impossibile applicazione a casi complessi; può rendere oscuro e inintelligibile il processo di assicurazione della sicurezza;
- l'approccio prestazionale appare più consono alla concezione più nobile dell'ingegneria che prevede capire il singolo problema e trovarne una specifica soluzione, che possa essere giustificata in maniera razionale trasparente; permette l'introduzione di concetti e misure innovative.

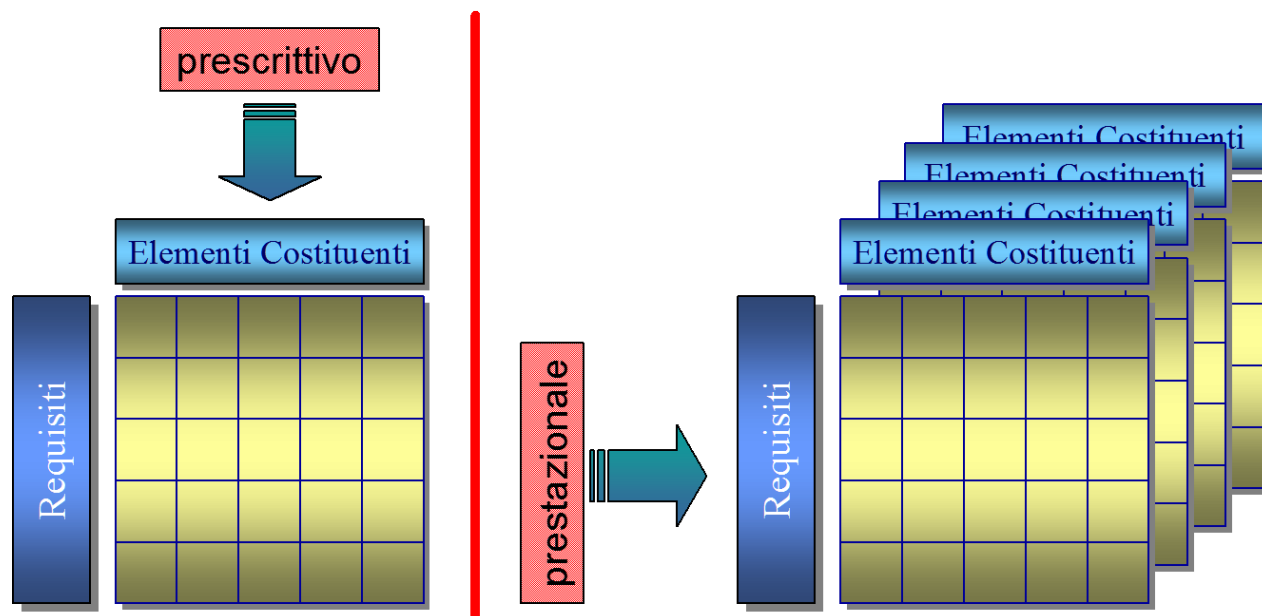


Figura 16 – Approccio prescrittivo e prestazionale alla progettazione antincendio [15].

## 5. RESISTENZA MECCANICA

La azione di incendio su una costruzione rappresenta una condizione di cimento strutturale che produce una complessa evoluzione delle caratteristiche meccaniche.

Dal punto di vista analitico, si tratta di prevedere e descrivere questa evoluzione con una analisi strutturale quasi statica che segua lungo lo sviluppo temporale dell'incendio lo stato della costruzione, in termini di variazione di rigidezza e resistenza.

A questo proposito, si può fare riferimento alla Fig.17 considerando che:

- La capacità portante  $R$  della struttura è funzione dell'evoluzione dell'incendio che è rappresentato schematicamente come una curva nel piano orizzontale temperatura ( $T$ ) – tempo ( $t$ ): lungo tale curva  $T(t)$  si può calcolare puntualmente la resistenza  $R(t,T) = R(t,T(t)) = R(t)$  che risulta in particolare decrescente anche nella fase di decadimento dell'incendio;
- Fissata la domanda prestazionale  $E_{fi,requ,t}$  ovvero un determinato livello di carico che definisce un piano orizzontale, si può vedere che se lungo tutto lo svolgimento dell'incendio la capacità portante  $R(t)$  risulta maggiore della domanda, la struttura risulta verificata; in questo caso, si ha quindi la **verifica nel dominio della resistenza**;

- (c) Invece, se ad un certo istante la domanda prestazionale  $E_{fi,requ,t}$  uguaglia la capacità  $R(t)$ , si ha il collasso strutturale: quell'istante  $t_{fi,d}$  deve essere maggiore o al limite uguale con il tempo  $t_{fi,requ}$  richiesto per garantire la sicurezza delle persone, eventualmente da evacuare; in questo caso si ha quindi la **verifica nel dominio del tempo**;
- (d) Infine, e solo nel caso in cui l'incendio sia rappresentato convenzionalmente da una temperatura monotonamente crescente nel tempo, come ad esempio rappresentato alla curva ISO 834, si può determinare la temperatura di collasso  $T_d$  che deve essere minore o al limite uguale ad una prescritta temperatura critica  $T_{cr}$ ; si ha in questo caso la **verifica nel dominio della temperatura**.

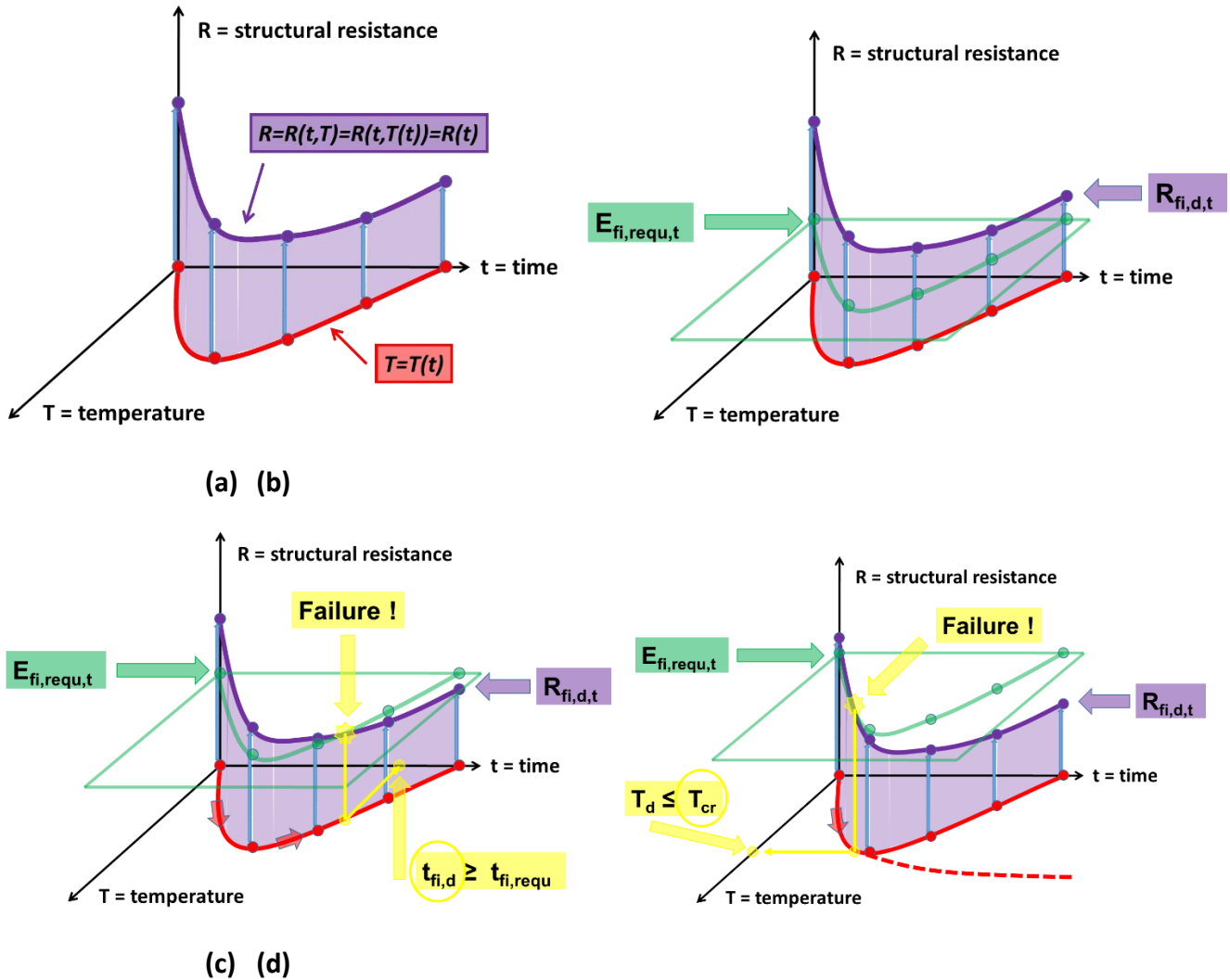


Figura 17 – Evoluzione della resistenza meccanica di una struttura durante un incendio: a) decremento della capacità portante anche durante la fase di decadimento dell'incendio; b) domanda prestazionale soddisfatta per tutta la durata dell'incendio; c) situazione di collasso quando la domanda prestazionale uguaglia la capacità: verifica nel dominio del tempo; d) utilizzo della verifica nel dominio della temperatura possibile solo per incendi nominali monotonamente sempre crescenti.

Come si vede, a parte situazioni elementari, una verifica effettiva e sostanziale di una costruzione in caso di incendio va al di là di semplici confronti numerici e soddisfacimento di stereotipi normativi. Infatti, solo l'analisi dell'evoluzione dello stato della costruzione lungo lo sviluppo dell'incendio è l'approccio corretto e coerente per valutarne la sicurezza. Infatti, si dovrebbe avere presente che in presenza di una azione così complessa, non è solo un singolo valore numerico o solo indicatore, quello che può garantire la sicurezza in modo sostanziale: il giudizio deve essere basato su considerazioni più ricche. Ad esempio in Fig. 18, si può seguire l'evoluzione della risposta strutturale in un parcheggio monopiano in cui si è considerato uno scenario che prevede l'incendio localizzato, espresso in forma di una curva convenzionale tipo ISO834 applicata ad una colonna laterale.

Le considerazioni da fare sono diverse:

- l'analisi deve essere sviluppata con un codice di calcolo (in questo caso Straus7) che sia capace di cogliere i due principali aspetti presenti in questa situazione: a) il **comportamento termo-meccanico**, ovvero la capacità di modellare il legame costitutivo in cui esiste dipendenza dalla temperatura; a) i **grandi spostamenti** che si sviluppano nel corso dell'incendio, a seguito della notevole riduzione di rigidezza dei materiali e l'interazione con i possibili fenomeni di instabilità';
- lungo l'evoluzione dell'incendio nel tempo, si devono considerare idonei parametri della risposta strutturale, per giudicare lo stato della costruzione; ad esempio, nella Fig.18, si è tracciato l'andamento dello spostamento verticale della sommità della colonna interessata dallo scenario localizzato di incendio: si può osservare che a) la sommità inizialmente si alza, a seguito della dilatazione della colonna dovuta al riscaldamento, b) successivamente, a circa 700 secondi, si ha un brusco abbassamento della colonna, dovuto ad un fenomeno di instabilità della colonna; c) segue una fase in cui la colonna è sostenuta dalla trave longitudinale che poggia sulle due altre colonne di spigolo;
- si vede, quindi, che lungo lo sviluppo temporale dell'incendio, si manifestano fenomeni meccanici come **bowing-effect** e **thermal-buckling** che devono essere noti e riconosciuti, e sulla base dei quali, anche se l'analisi strutturale continua, deve essere giudicato l'istante in cui la costruzione non è più razionalmente sicura.

È necessario aggiungere che non è solo l'istante di collasso di interesse, ovvero la sua capacità portante. È, infatti, essenziale anche riuscire a prevedere le modalità effettive di collasso: si consideri ad esempio, la Fig. 19, dove si suppone che la struttura possa collassare con una modalità che non prevede svio (sopra) e una che prevede lo svio (sotto): il primo caso, può comportare danni alle persone esterne e alle costruzioni circostanti, consentendo una propagazione dell'evento negativo con collasso progressivo; nel secondo caso, l'evento, per quanto negativo, resta confinato.

È questa necessità di analizzare anche gli aspetti più sottili della risposta strutturale in caso di incendio, che rende il tema difficile ma anche affascinante, specie nelle grandi strutture e negli edifici alti [16, 17].

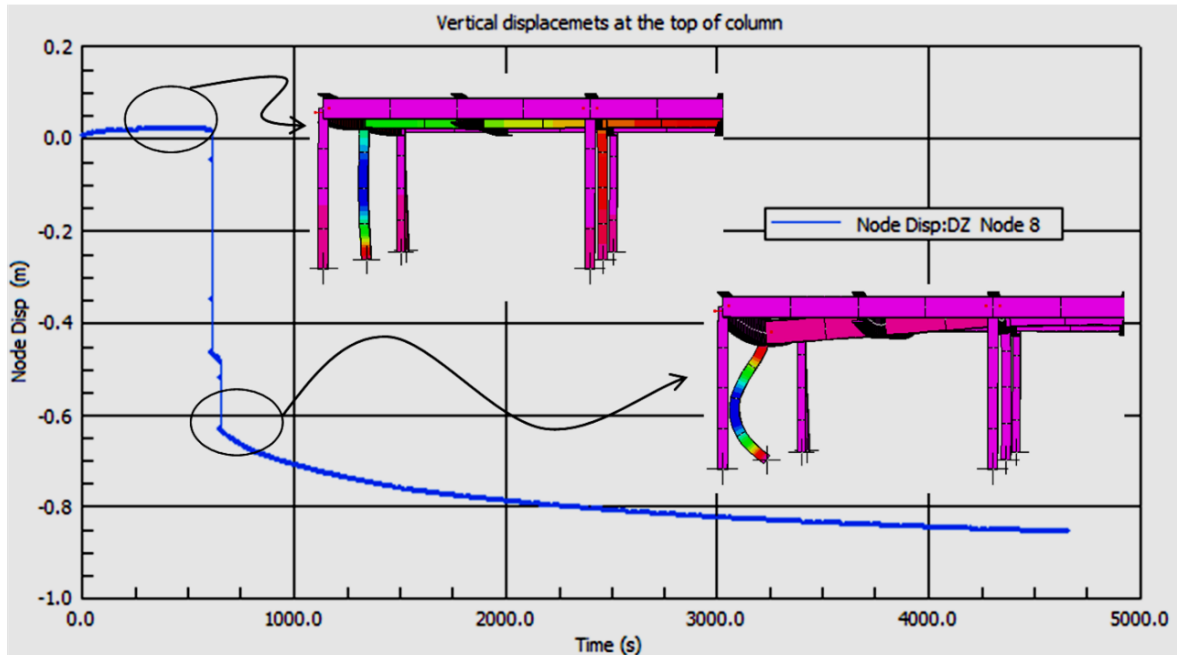


Figura 18 – Esempio di analisi evolutiva per la struttura di un parcheggio monopiano: spostamento verticale della sommità di una colonna interessata da uno scenario di incendio localizzato in prossimità della stessa.

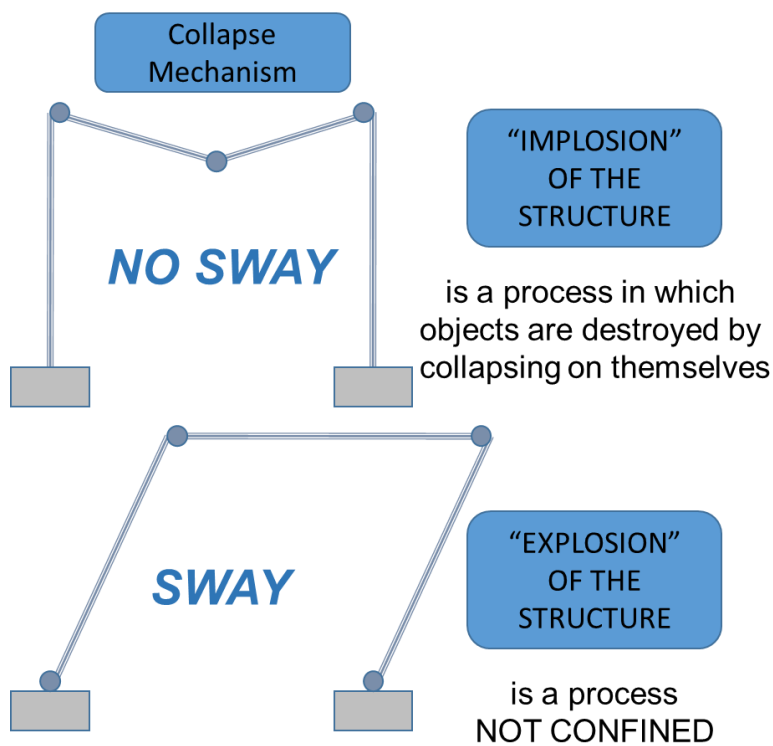


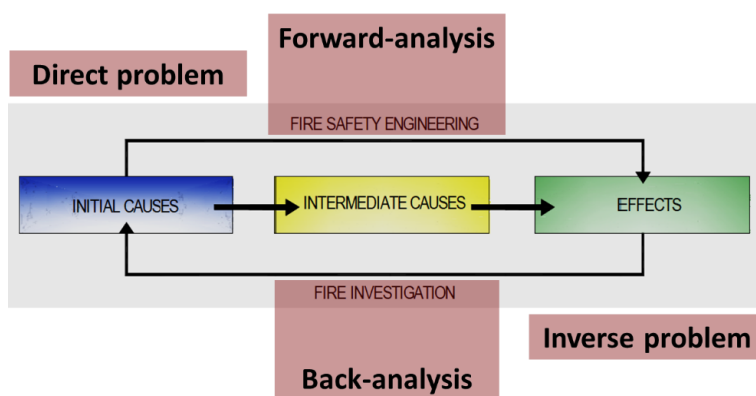
Figura 19 – Discriminazione fra un collasso di tipo implosivo (confinato) e uno espansivo foriero di propagazione del danno alle costruzioni adiacenti – collasso progressivo - e pericoloso per le persone nelle vicinanze.

## CCONCLUSIONI

In questo contributo si sono presentati i dovuti presupposti, ricchi e generali, alla progettazione strutturale antincendio. Tradizionalmente, questo settore ha sofferto di una notevole dispersione di concetti e metodi, in parte giustificabile con l'ampiezza della problematica ma in parte indotta dalla mancanza di una visione concettuale unitaria. In ordine, i concetti presentati sono stati:

1. le peculiarità delle azioni accidentali e il principale requisito strutturale per contrastarle, ovvero la robustezza;
2. le caratteristiche estensive e intensive dell'incendio, con le possibili strategie di prevenzione, protezione attiva e passiva, fino alla robustezza;
3. l'impostazione sistemica della sicurezza e il fallimento secondo il modello di Reason;
4. l'impostazione multidisciplinare della progettazione antincendio;
5. gli aspetti di resistenza strutturale in caso di incendio con valutazione delle modalità di collasso.

Lo studio e l'approfondimento di questi aspetti e la loro corretta e coerente applicazione può portare a significativi passi in avanti nella progettazione strutturale antincendio. Allo stesso tempo, non si può non accennare, come ultima osservazione, al fatto che anche dagli eventi negativi, ovvero dagli incendi avvenuti, e dalle loro conseguenze, si possono trarre enormi benefici. Infatti, con riferimento alla Fig. 20, se nel complesso la Fire Safety Engineering può essere vista come un problema diretto di assicurazione della sicurezza, la cosiddetta Fire Investigation può servire come problema inverso a risalire alle cause dell'evento e insegnare come migliorare la prossima volta [18]: questo incremento di conoscenza e miglioramento continuo, è il fine positivo della cosiddetta Ingegneria Forense [19].



**Figura 20 – Progettazione strutturale antincendio come problema diretto (forward-analysis) e investigazione in caso di incendio come problema inverso (back-analysis) per la risalita alle cause.**

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori sono riconoscenti agli Ingg. Claudio De Angelis, Mauro Caciolai, Luca Ponticelli, Cristina D'Angelo e Michele Mazzaro per tutti gli spunti e le indicazioni avute, anche se sono gli autori responsabili di tutte le affermazioni qui prodotte. L'esempio del parcheggio è stato svolto con il codice di calcolo Straus7 distribuito in Italia dalla HSH s.r.l di Padova dell'Ing. Piergiorgio Perin ([www.hsh.info](http://www.hsh.info)).

## RIFERIMENTI

- [1] Atti del Convegno GLI EUROCODICI PER LA PROGETTAZIONE STRUTTURALE ANTINCENDIO, 18 settembre 2008, ISA Roma, F. Bontempi, C. Crosti, L. Giuliani, "LA ROBUSTEZZA STRUTTURALE NEI CONFRONTI DELLE AZIONI ACCIDENTALI",  
[http://www.vigilfuoco.it/asp/download\\_file.aspx?id=4830](http://www.vigilfuoco.it/asp/download_file.aspx?id=4830)
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ronan\\_Point](https://en.wikipedia.org/wiki/Ronan_Point)
- [3] Starossek, U. (2009). Progressive Collapse of Structures., Thomas Telford Publishing, London, July 2009.
- [4] Bontempi F., "Robustezza strutturale", Relazione ad invito, Atti del Convegno CRASC'06, Università degli Studi di Messina, Messina, 20-22 aprile 2006, Dario Flaccovio.
- [5] Taleb, Nassim Nicholas (April 2007), "The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable." (1st ed.). London: Penguin. p. 400. ISBN 1-84614045-5.
- [6] Crosti C., Olmati P., Gentili F., (2012), "Structural response of bridges to fire after explosion", IABMAS2012, Stresa, Lake Maggiore, Italy, July 8-12
- [7] ISO/TR 13387-1:1999 - Fire Safety Engineering.
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/Great\\_Chicago\\_Fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Great_Chicago_Fire)
- [9] <http://www.elmundo.es/documentos/2005/02/windsor/album1/index.html>
- [10] NILIM (2005): "Report on the Windsor Building Fire in Madrid, Spain", National Institute for Land and Infrastructure Management, Japan, July 2005 (in Japanese).
- [11] S. Marsella, L. Nassi, "L'ingegneria della sicurezza antincendio e il processo prestazionale. Guida alla fire safety engineering ed esempi applicativi.", EPC.
- [12] [http://www.francobontempi.org/handling\\_08.php](http://www.francobontempi.org/handling_08.php)
- [13] Bontempi F., Crosti C., Giuliani L., (2008), "Il ruolo delle strutture nella protezione passiva contro l'incendio". Rivista Antincendio, Agosto 2008.
- [14] [https://en.wikipedia.org/wiki/Swiss\\_cheese\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Swiss_cheese_model)
- [15] S. Arangio, F. Bontempi, "Basis of the analysis and design for fire-induced collapses in structures.", International Journal of Lifecycle Performance Engineering (IJLCPE), Vol.1, No 2, 2013.
- [15] Bontempi F., Crosti C., Giuliani L. Petrini F., (2009), "Basi della progettazione strutturale antincendio con approccio prestazionale: Applicazioni". Rivista Antincendio, Giugno 2009
- [16] F. Petrini, "Performance-based fire design of complex structures.", International Journal of Lifecycle Performance Engineering (IJLCPE), Vol. 1, No. 2, 2013.
- [17] F. Gentili, L. Giuliani, F. Bontempi, "Structural Response of Steel High Rise Buildings to Fire: System Characteristics and Failure Mechanisms.", Volume 4 · Number 1 · 2013, Journal of Structural Fire Engineering.
- [18] F. Bontempi, C. Crosti, M. Mangione, "L'investigazione antincendio sugli aspetti strutturali: una proposta di codifica.", Rivista Antincendio, 2015.
- [19] N. Augenti, F. Bontempi (editor), Ingegneria Forense, Crolli, Affidabilità Strutturale e Consolidamento, Atti del Convegno IF CRASC '15 - 14/16 maggio 2015, Roma, Dario Flaccovio.