

## **PROGETTO DI RICERCA PER LO STUDIO DEGLI SCENARI E DELL'EVOLUZIONE DI INCENDI NEL COMPLESSO MONUMENTALE DI PALAZZO REALE DI VENEZIA**

**Schrefler, B.A.1, Brunello, P.2, Vigne, G.3, Dattilo, F.4, Carretto, M.4, Codello, R.5, Lionello, A.5**

**1 Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, via F. Marzolo 8, Padova, 35131, Italia**

**2 Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Fisica Tecnica, via Venezia 1, Padova, 35131, Italia**

**3 Areatecnica srl, Viale Dolomiti 24, Mas di Sedico, 32025, Italia**

**4 Comando provinciale Vigili del Fuoco di Venezia, Strada della motorizzazione civile 6, Mestre, 30170, Italia**

**5 Soprintendenza BAPPSAE di Venezia e laguna. San Marco 1, Venezia, 30124, Italia**

### **SOMMARIO**

Lo studio della dinamica evolutiva di incendi in edifici storico-monumentali comporta l'analisi di aspetti e tematiche più numerose e complesse di quelle che si affrontano considerando un approccio deterministico-prescrittivo oppure un più nuovo approccio di tipo prestazionale alla sicurezza antincendio. Infatti, parallelamente agli obiettivi "classici" (esodo in sicurezza ed incolumità di persone e squadre di soccorso, resistenza e stabilità delle strutture per un tempo predeterminato), negli edifici storici occorre mirare anche alla salvaguardia degli edifici stessi nonché delle opere d'arte presenti al loro interno, cercando di limitare i danni che un incendio potrebbe causare tanto al contenente, quanto al contenuto. Gli edifici storico-monumentali, per tipologia e complessità, pongono notevoli problematiche nell'ambito di un progetto di prevenzione e sicurezza antincendio; per conseguire, quindi, gli obiettivi di sicurezza necessari, l'unica via alternativa ad un approccio deterministico-prescrittivo (che nella maggior parte dei casi porterebbe a pesanti ed invasive modifiche estetico-strutturali) consiste nel ricorso alla Fire Safety Engineering (FSE), attraverso la schematizzazione e la modellazione di scenari d'incendio realistici, ritenuti particolarmente pericolosi per l'incolumità delle persone, per le strutture e per le opere d'arte presenti nell'edificio. Strumento prezioso nelle mani del progettista per studiare gli aspetti legati all'evoluzione dell'incendio nell'ambito della FSE è la Computational Fluid Dynamics (CFD), che consente uno studio virtuale degli scenari di cui sopra. La modellazione oggetto della presente riguarda il complesso di Palazzo Reale, in piazza San Marco a Venezia, il cui valore storico-architettonico, unitamente alla ricchezza e all'importanza delle opere in esso contenute, ne fanno un patrimonio culturale di inestimabile valore. Di conseguenza, qualsiasi possibile danno prevedibile dovrebbe essere evitato, considerando anche che la particolare morfologia dell'area rende l'intervento delle squadre di soccorso particolarmente difficoltoso.

### **1.0 DESCRIZIONE DELLA MODELLAZIONE**

Il complesso di Palazzo Reale è composto dagli edifici monumentali della Zecca, della Libreria Sansoviana, delle Procuratie Nuove e dall'Ala Napoleonica, edifici di epoche diverse (costruiti tra il XIV ed il XVIII secolo) e caratteristiche architettoniche diverse, con un imponente volume edilizio di circa 160000 m<sup>3</sup> che si sviluppa su una pianta di circa 7200 m<sup>2</sup>. Le strutture edilizie sono in muratura di laterizio con solai in legno, anche con luci rilevanti. All'interno del complesso si sviluppa il percorso museale marciano, composto da museo Correr, museo Archeologico e sale monumentali della Libreria, ed hanno sede gli uffici dell'Avvocatura di Stato, del Ministero per i Beni e le Attività Culturali e la Biblioteca Nazionale Marciana. Nell'ambito della modellazione sono stati valutati con particolare attenzione:

- a) le reazioni di combustione dei materiali presenti, al fine di caratterizzarne i meccanismi di pirolisi in base a bilanci stechiometrici, oltre che la tipologia quali-quantitativa dei fumi e delle specie tossiche per le persone e/o dannose per le opere d'arte;

- b) i moti convettivi dei prodotti di combustione, per caratterizzare il campo di velocità e quindi la propagazione dei fumi e degli eventuali prodotti di pirolisi incombusti;
- c) l'irraggiamento dei fumi e delle fiamme su persone, strutture ed opere d'arte, meccanismo di scambio termico dominante in presenza di temperature elevate quali quelle che si raggiungono in un incendio;
- d) la conduzione attraverso oggetti solidi, al fine di determinarne i gradienti termici che agiscono sulle strutture e sulle opere d'arte;
- e) la variazione delle caratteristiche meccaniche della struttura, la resistenza al fuoco e la stabilità a seguito dei gradienti termici, per valutare danni e tolleranze;
- f) la propagazione dell'incendio, basandosi sulle metodologie proprie del "risk assesment".

Sono stati studiati, dunque, l'evoluzione e la propagazione dell'incendio, le temperature e le concentrazioni di specie tossiche lungo i percorsi d'esodo, le modalità con cui potrebbe essere compromessa la resistenza delle strutture a causa dei flussi termici, gli effetti che si manifesterebbero sulle opere d'arte come conseguenza dello scenario considerato, in modo tale da agire laddove si renda necessario, nei modi e nei tempi evinti dai risultati della ricerca, in base ai quali è inoltre possibile verificare l'esattezza delle destinazioni d'uso ed eventualmente schematizzare gli interventi (possibilmente non invasivi o comunque compatibili con l'ambiente) che dovrebbero e/o potrebbero essere realizzati.

## **2.0 OBIETTIVI DELLA MODELLAZIONE**

La modellazione si pone come obiettivo quello di analizzare qualitativamente e valutare quantitativamente gli effetti che un incendio può avere in un edificio storico-monumentale. Per il conseguimento di tale scopo, trattandosi di analisi molto specifiche, si è dovuto ricorrere a metodologie e strumenti non presenti sul mercato, ma studiati, ottimizzati ed adattati alla particolare applicazione cui devono rispondere. La base, ovvero il punto di partenza, di tale metodologia è un software di fluidodinamica computazionale, Fire Dynamics Simulator (FDS), ottimizzato per flussi "fire-driven", che risolve numericamente una forma delle equazioni di Navier-Stokes appropriata per flussi a bassa velocità e "thermally-driven", e che valuta con particolare attenzione i fenomeni di trasporto di massa. La scelta di tale modello, sviluppato dal Building and Fire Research Laboratory (BFRL) del National Institute of Standards and Technology (NIST) americano, si motiva per l'elevata accuratezza dei risultati ottenuta con più di venticinque anni di sviluppo e revisione critica. La metodologia ingloba poi alcuni modelli, sviluppati dal Dipartimento di Fisica Tecnica e dal Dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova, studiati e plasmati per l'applicazione cui devono rispondere in funzione degli obiettivi da raggiungere, che utilizzano come input i dati di output di FDS, e che in output forniscono i parametri richiesti. In particolare, si tratta di sub-models per valutare i flussi termici, soprattutto radianti, e la resistenza strutturale. Completano la metodologia un procedimento per ottimizzare la chimica che è alla base delle reazioni di combustione ed uno finalizzato al "risk assesment". Di particolare importanza è, appunto, la valutazione del rischio ovvero la stima, in base ad algoritmi teorici, databases e ricerche bibliografiche, in maniera teorico-statistico-probabilistica di quale potrebbe essere la propagazione delle fiamme e di quali potrebbero esserne le conseguenze.

## **3.0 MODELLAZIONE DEGLI SCENARI**

Il punto di partenza della ricerca è stato quello di individuare gli scenari d'incendio da analizzare, che sono stati scelti tra quelli più gravosi ed estremi, ma realisticamente ipotizzabili, tenendo conto del principio logico che ha ispirato le NFPA 914 americane (norme volontarie sugli edifici storici). Sono stati definiti due scenari; A e B. Lo scenario A fa parte del percorso museale marciando ed è ubicato al primo piano del complesso monumentale di Palazzo Reale. Esso fa parte delle zone aperte al pubblico ed include un importante percorso d'esodo. Le altezze dei locali superano i sette metri, ad eccezione dei vani sopra i quali è realizzato il piano ammezzato. Lo scenario B è ubicato al primo piano ammezzato, e costituisce un archivio/deposito libri; i locali non sono aperti al pubblico per cui, in caso di incendio, assumono importanza non rilevante gli aspetti legati all'esodo. Tuttavia, essendo presenti notevoli quantità di materiali combustibili al suo interno, un incendio potrebbe causare notevoli danni alle strutture, che andrebbero di conseguenza a compromettere la statica dell'edificio nel suo complesso, nonché ai libri presenti al suo interno, la maggior parte dei quali di inestimabile

valore. In particolare, la scelta dello scenario A (Figura 1) ha dato modo di considerare un incendio che si sviluppa durante una fase normale dell'attività, con condizioni di materiali presenti tipiche dello svolgimento normale della stessa (Scenario 1 NFPA 914) e, allo stesso tempo, un incendio intenso, dovuto al maggior carico di incendio possibile (che, nel nostro caso coincide, con quello ordinario), nelle normali operazioni svolte nell'edificio, con crescita rapida ed in presenza di persone (Scenario 6 NFPA 914). Esso costituisce uno scenario importantissimo perché investe direttamente l'obiettivo principe che resta comunque quello della salvaguardia della vita umana, poiché risulta ubicato in prossimità di una via d'esodo importante ed inoltre può causare una rapida propagazione di prodotti di combustione sugli elementi strutturali e sui beni da proteggere (Scenario 2 NFPA 914). Lo scenario B (Figura 2) ha invece permesso di descrivere un incendio con innesco in un locale in cui non sono normalmente presenti persone, ma che per la sua posizione può mettere in pericolo un gran numero di persone presenti in un altro locale dell'edificio (Scenario 3 NFPA 914). Inoltre, questo scenario permette di rappresentare una area di grande interesse per i beni presenti, e al tempo stesso una zona in cui anche l'accesso ed il movimento delle squadre di soccorso risultano notevolmente difficoltosi.

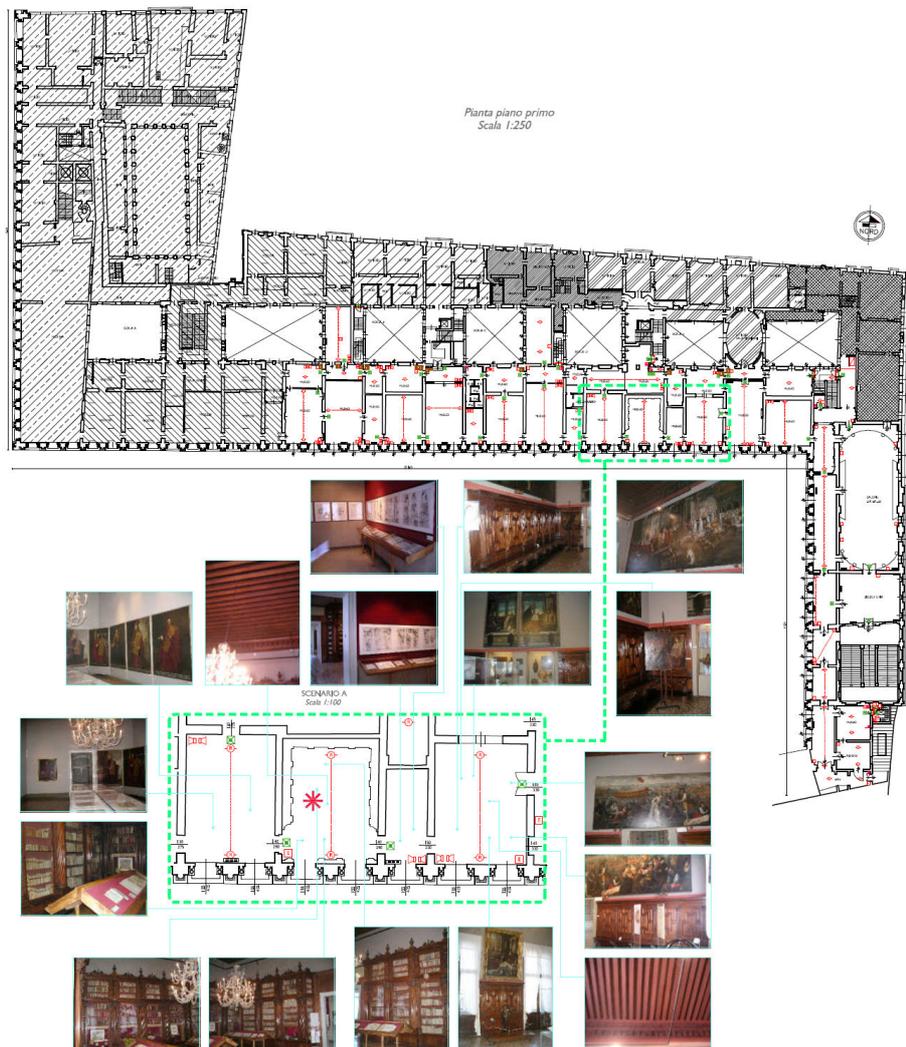


Figura 1. Scenario A

E' stata ottimizzata la fase di modellazione tridimensionale della geometria in oggetto attraverso software specifici interfacciati con FDS. Particolare attenzione è stata posta nella scelta dei principi d'innesco, valutati realisticamente a seguito di sopralluoghi con valori di potenza termica desunti da [1] e [2]. I dati indispensabili a caratterizzare il comportamento termo-chimico-fisico dei materiali sono stati raccolti da ricerche bibliografiche ([3], [4], [5]). In particolare, si è reso necessario definire in maniera precisa il valore di densità, conducibilità, calore specifico a pressione costante, emissività,

calore di combustione, calore di vaporizzazione e temperatura di ignizione per i materiali che caratterizzano gli scenari in esame, quali ad esempio legno (abete, noce, truciolato, canne vegetali), carta, cartone, cotone, lana, nonché dei materiali incombustibili quali vetro, materiali edilizi (laterizio, cartongesso, intonaco), oltre al tipico terrazzo alla veneziana.

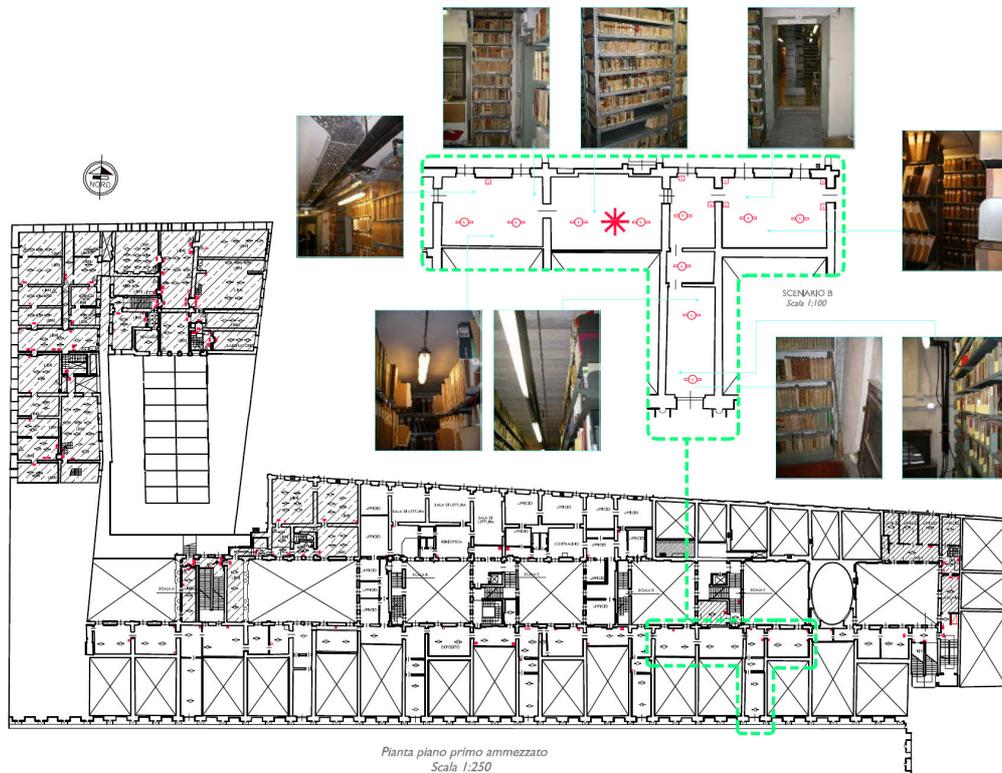


Figura 2. Scenario B

Lo sviluppo e la propagazione dell'incendio si basano su reazioni di combustione e produzione di fumi desunte da [3], e/o ricavate da procedimenti descritti in [3] e [6]. Questi si basano sull'assunzione che il calcolo della frazione di massa di monossido di carbonio e di particolato solido può essere effettuata a partire dalla conoscenza della frazione di massa stechiometrica per la massima conversione possibile del monomero di combustibile nel prodotto che si considera. Occorre notare che la frazione in massa è una proprietà di ogni singolo materiale o agglomerato combustibile, e pertanto ogni singola reazione deve essere caratterizzata opportunamente con la propria produzione di CO e particolato solido. Per il calcolo strutturale è stato adottato un software nato specificatamente per l'analisi termica e meccanica di elementi strutturali esposti al fuoco. La caratterizzazione termica avviene mediante l'imposizione delle condizioni al contorno convettive e di irraggiamento, in riferimento a curve di normativa e/o a "temperature histories" definite in seguito ad analisi fluidodinamiche. Le proprietà termo-meccaniche del materiale sono tutte dipendenti dalla temperatura, per cui è necessario caratterizzare in maniera piuttosto dettagliata, nello spazio e nel tempo, il carico termico agente. La caratterizzazione meccanica di ogni singolo elemento strutturale permette di determinarne il momento flettente massimo, la resistenza a compressione, il carico critico euleriano (se richiesto) e la capacità portante di progetto.

### 3.1 Valenza operativa degli scenari individuati

Le deduzioni dello studio svolto per chi deve operare il soccorso sono sintetizzate di seguito.

**A) Scenario museale:** in ottica di tutela della vita umana, i risultati dell'elaborazione confermano anche nel caso del Museo Correr il giudizio qualitativo ascrivibile al rischio per le persone in caso di incendio: i tempi necessari per un incendio sviluppatosi in un museo, ancorché in una struttura storica, per raggiungere livelli di rischio acuto sono di gran lunga superiori a quelli per l'esodo e consentono ai soccorritori un margine di tempo ragionevole per iniziare uno spegnimento efficace. Nel

caso contingente, il fumo impiega 4 minuti per passare da un ambiente all'altro; in presenza di un allarme antincendio, anche considerando pessimisticamente l'allarme all'istante in cui compaiono le fiamme, le persone escono praticamente immediatamente. I fattori di sicurezza, per strutture ed impianti, sono molteplici:

- a) in condizioni ordinarie, cioè non di allestimento, l'ordine necessario per la visibilità di quanto esposto contrasta anche la propagazione delle fiamme;
- b) i materiali solitamente comportano carichi di incendio modesti anche quando si consideri in contributo delle strutture lignee come i solai,
- c) i combustibili sono sostanzialmente sostanze solide;
- d) gli impianti elettrici esercitano in condizioni non stressanti essendo prevalenti i carichi luce, durante l'esercizio è presente personale di presidio e ormai raramente le strutture museali sono prive di impianto di rivelazione incendio.

In questo quadro, il soccorso può essere ostacolato sostanzialmente solo da difficoltà di accesso o di raggiungimento del sito: va quindi pianificato il soccorso notturno o più in generale durante il periodo di chiusura. Ma chi opera e che pianifica il soccorso lo fa con la ragionevole sicurezza di operare in una struttura pregevole, con caratteristiche di fragilità e con contenuti preziosi, ma deserta.

**2) Scenario nel deposito:** questo secondo scenario è foriero, in misura di gran lunga superiore al primo, di preoccupazioni per i soccorritori. La presenza di ordine perfetto e divieto di accesso ai non autorizzati possono mitigare al massimo il rischio di incendio, tuttavia il deposito intensivo di libri, obbedendo a legittime esigenze di pieno sfruttamento dello spazio, crea ottime condizioni per la propagazione dell'incendio e pessime condizioni di accessibilità, sia per la presenza di spazi angusti sia per la diminuzione di visibilità dovuta al fumo, che pregiudica il soccorso fin dall'inizio. Le aggravanti in questo scenario sono da un lato il pregio dei materiali esposti al rischio incendio, a fronte del quale lo spegnimento comporta danni rilevanti o irreparabili, e dall'altro le difficoltà legate alla probabile assenza del personale addetto, valido supporto nelle operazioni. Considerando il tempo normale di percorrenza dalla sede VF più vicina, attorno ai 5 minuti, il minuto impiegato per la propagazione da un piano di scaffalatura a quella superiore porge ai soccorritori una situazione già esacerbata. In tal senso, se non difficile, lo spegnimento sarà certamente molto dannoso. Conviene quindi indirizzare la ricerca di soluzioni nel campo della prevenzione: ritenendo preminente l'innescò per causa elettrica, la realizzazione di impianti elettrici del tipo IT – M, in grado di segnalare con un allarme la perdita dell'isolamento, può migliorare molto le condizioni di sicurezza segnalando in congruo anticipo i segnali premonitori del cortocircuito per l'impianto.

#### **4.0 RISULTATI**

Le simulazioni lanciate si pongono ciascuna un obiettivo, in modo da ottimizzare i tempi di calcolo e la quantità (e qualità) dei dati da gestire in fase di post-processing. Lo scenario A investiga in modo particolare la propagazione dei fumi, soprattutto lungo i percorsi d'esodo, ed i danni che i flussi radianti e/o le specie chimiche possono provocare sulle opere d'arte. Lo scenario B vuole studiare la propagazione di un incendio innescatosi in una zona con una notevole quantità di materiale combustibile ed i danni da esso provocati sulle strutture. A questo proposito, al contrario di quanto succede nello scenario A, vista l'impossibilità di reperimento di materiale inerente le strutture lignee costituenti il solaio delle stanze dell'innescò e di quelle ad essa adiacenti (anche per la presenza di un controsoffitto non asportabile), si è svolta l'analisi strutturale sulle travi (a vista) nella stanza più a sud dello scenario B (Figura 2) in modo tale da valutare gli effetti dell'incendio anche in ambienti lontani dall'innescò.

#### **4.1 Propagazione dell'incendio**

La propagazione delle fiamme, nonché l'ignizione di materiali e strutture posti in locali diversi da quello dell'innescò, e dunque la propagazione dell'incendio, è un aspetto molto delicato da valutare con algoritmi e procedure di "risk assesment", facenti parte della metodologia oggetto della modellazione, e che consentono di determinare realisticamente come le fiamme possono evolvere, al fine di stimare tutti i parametri e le caratteristiche necessarie per conseguire gli obiettivi di cui ai paragrafi precedenti. Alcune procedure e metodologie per la valutazione del "risk analysis" sono descritte in [7], [8], [9].



Figura 3. Particolari modellazione scenario A (sinistra) e scenario B (destra)

#### 4.2 Risultati scenario A

Si mostrano in questo paragrafo i risultati principali ottenuti per lo Scenario A, che ha come obiettivo principale quello di soddisfare la salvaguardia della vita umana, e si pone come scopo quello di valutare i danni su importanti opere d'arte.

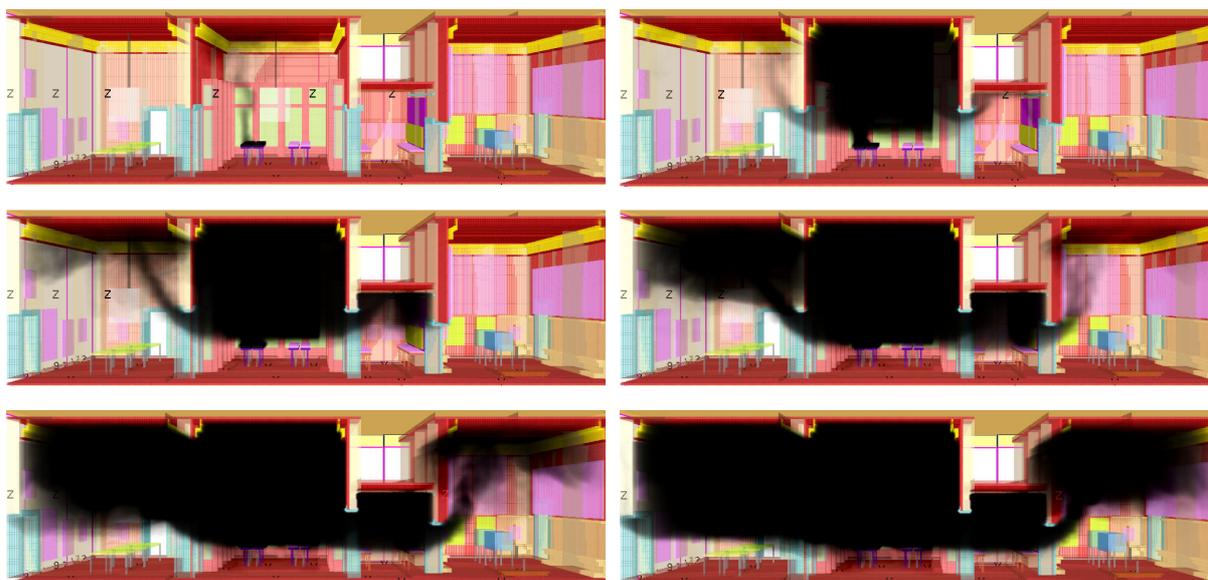


Figura 4. Propagazione fumi in diversi istanti temporali

Come si osserva dalle Figure 5 e 6, è stato dimostrato che, per i primi 250 secondi dopo l'ignizione, lungo le vie d'esodo ad una distanza di 1.5 m dal pavimento, si ha visibilità ottimale, condizione che varia notevolmente dopo la rottura dei vetri, che avviene all'incirca intorno ai 400 s; in seguito i valori di visibilità si abbassano notevolmente fino a valori inaccettabili per l'esodo in sicurezza degli occupanti. Lo stesso comportamento vale per quanto riguarda la concentrazione di specie tossiche per l'uomo quali ad esempio CO (Figura 7). La produzione di anidride carbonica, invece, dopo essere aumentata notevolmente come conseguenza della rottura dei vetri (Figura 8), cala vistosamente poiché, quando la quantità di ossigeno non è eccessivamente alta, tende a formarsi principalmente CO piuttosto che CO<sub>2</sub>.

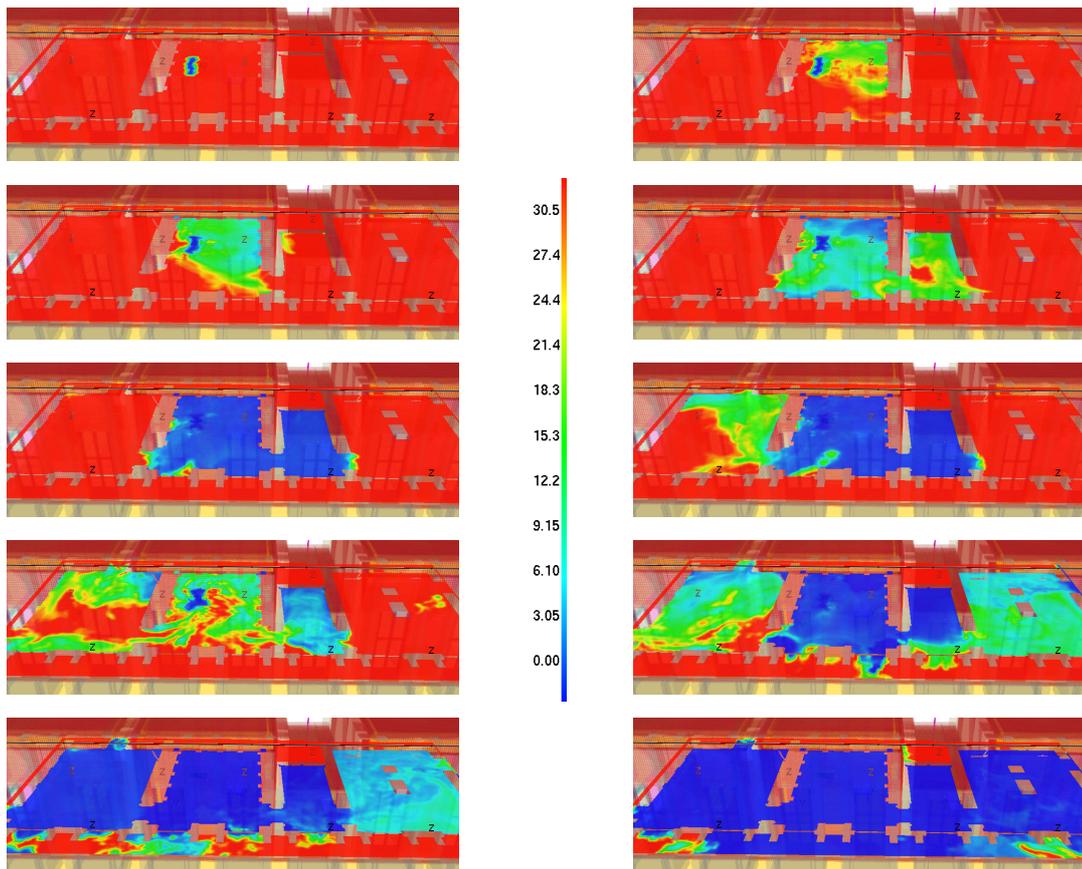


Figura 5. Visibilità in diversi istanti temporali,  $h=1.5$  m (fondoscala [m]: 0 – 30.5)

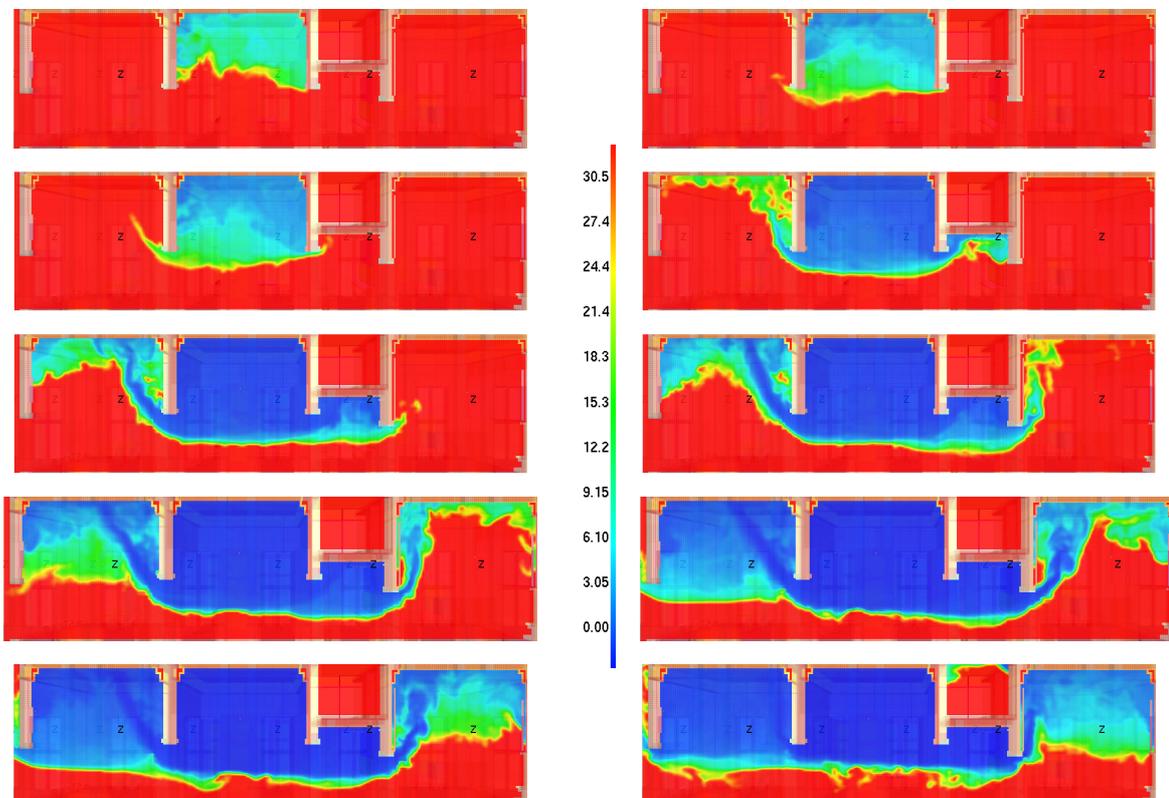


Figura 6. Visibilità in diversi istanti temporali (fondoscala [m]: 0 – 30.5)

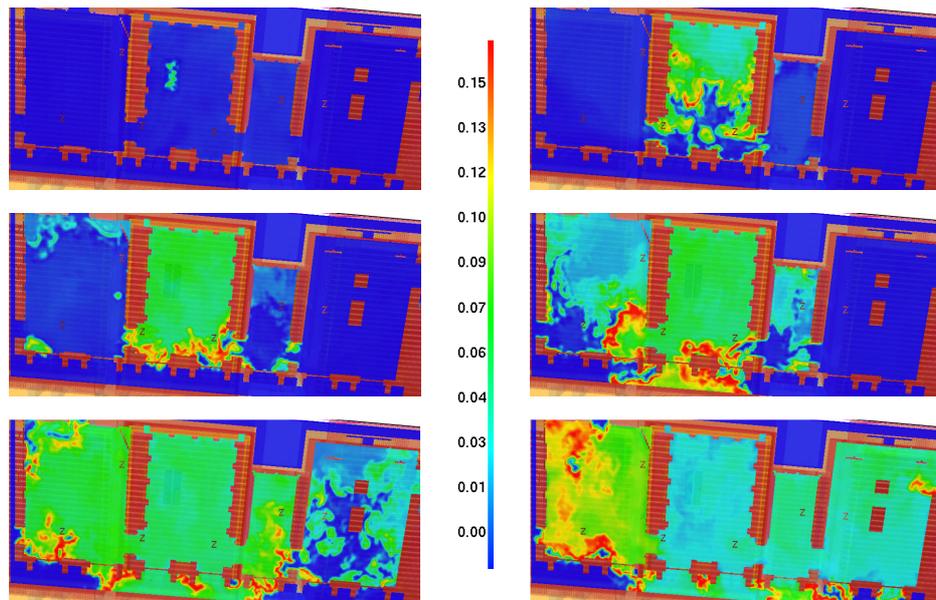


Figura 7. Concentrazione di CO in diversi istanti temporali (fondoscala [mol/mol]: 0 – 0.15)

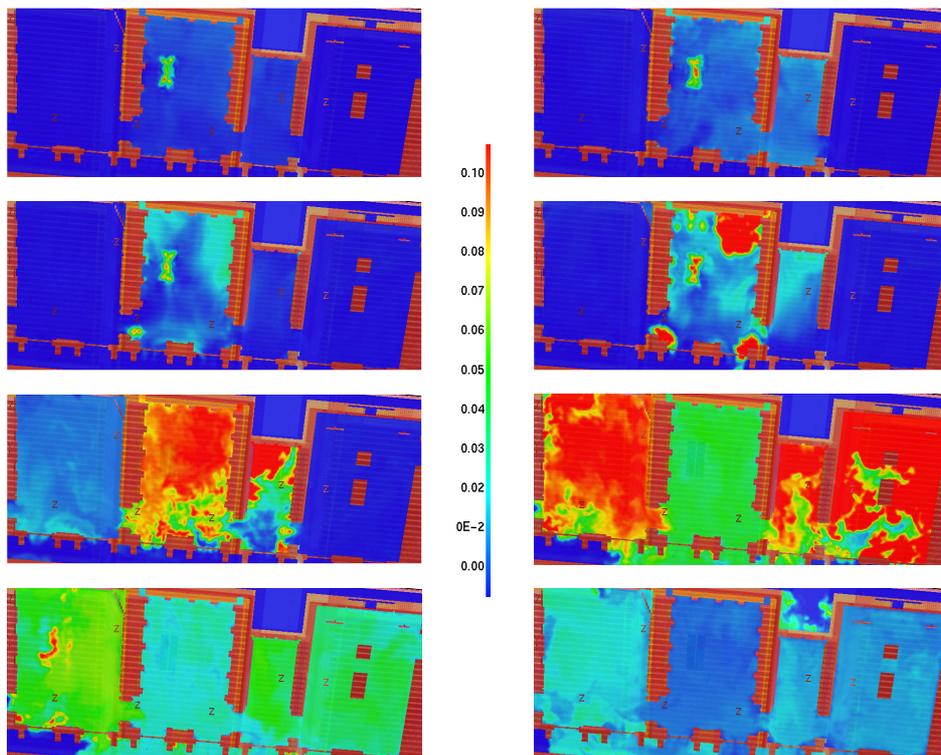


Figura 8. Concentrazione di CO<sub>2</sub> in diversi istanti temporali (fondoscala [mol/mol]: 0 – 0.10)

Analogamente, anche le temperature (Figura 9) si mantengono lungo le vie d'esodo per almeno 400 secondi al di sotto dei valori critici per l'esodo in sicurezza (50-70°C). La stessa osservazione vale per quanto riguarda flussi termici (radianti soprattutto) e particolato solido. Mediante sensori opportunamente posizionati, sono stati valutati i parametri critici per le opere d'arte. Fino a 400 secondi, le temperature delle tele si mantengono al di sotto dei 50°C (occorre notare che le tele si trovano nelle stanze estreme del dominio di calcolo considerato), mentre il particolato solido, che potrebbe depositarsi su di esse provocando notevoli danneggiamenti, si mantiene al di sotto di 300 mg/m<sup>3</sup>.

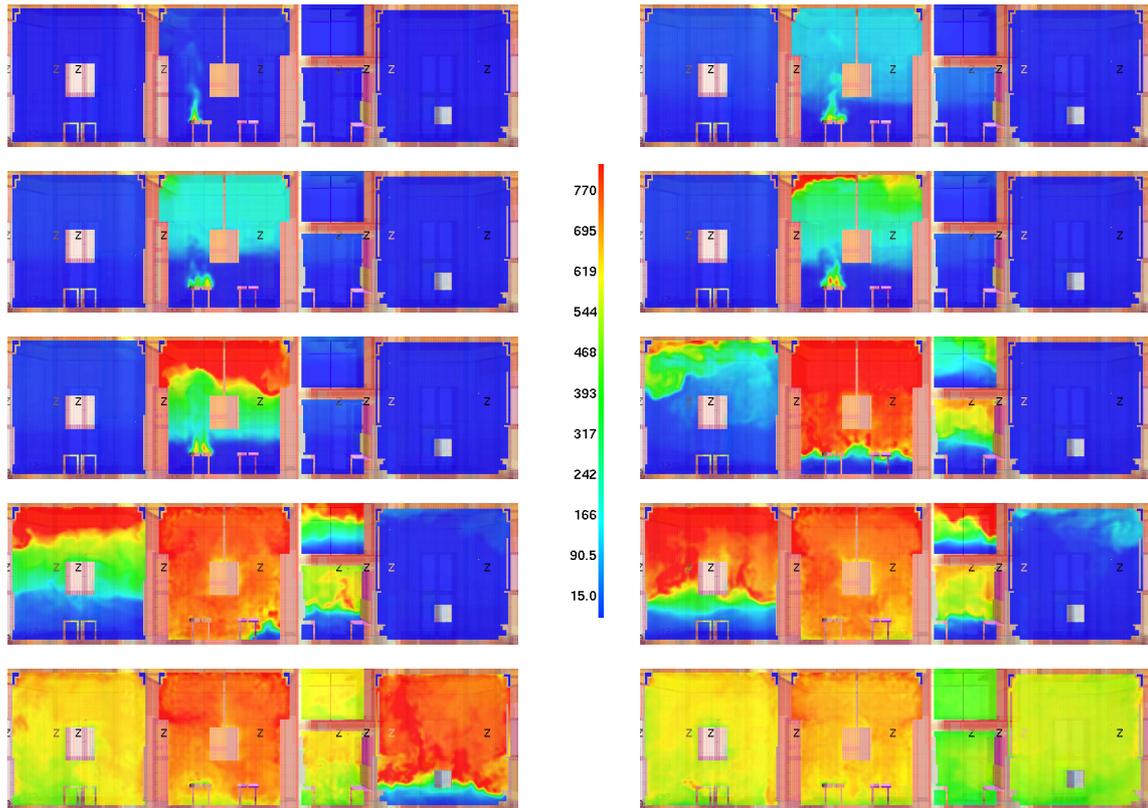


Figura 9. Campo di temperatura in diversi istanti temporali (fondoscala [°C]: 20 - 770)

#### 4.3 Risultati scenario B

Si mostrano in questo paragrafo i risultati principali ottenuti per lo Scenario B.

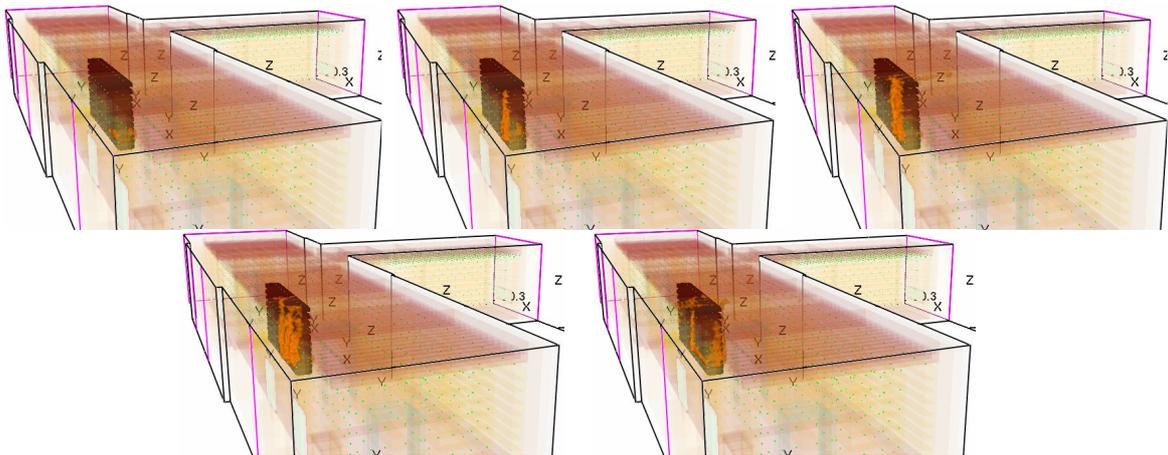


Figura 10. Evoluzione del fuoco in diversi istanti temporali

Lo scenario B vuole valutare gli effetti dell'incendio in un ambiente che per le sue stesse caratteristiche intrinseche rappresenta un punto di criticità per quanto riguarda l'accesso, il movimento ed il raggiungimento dei luoghi da parte dei soccorritori. Per questo scenario, la notevole quantità di materiale combustibile, nonché la particolare conformazione strutturale, rende un qualsiasi innesco potenzialmente molto dannoso. Ad una rilevante quantità di fumo che invade repentinamente i locali attigui a quello dell'innesco (Figura 11), si aggiungono le elevate temperature (Figure 12 e 13) e gli elevati flussi radianti che si raggiungono in tempi brevi; questo fatto, in effetti, unitamente alla

vicinanza e alta densità del materiale combustibile, potrebbe provocare il raggiungimento del flashover, con conseguenze rilevanti per l'intera struttura. Dalle figure 10-14 si nota come, nelle fasi dell'incendio precedenti al flash-over, ovvero per quelle fasi per cui FDS fornisce risultati precisi, affidabili e conservativi, un incendio dovuto ad un innesco nell'archivio/deposito può causare danni ingenti, soprattutto vista la presenza di una notevole quantità di materiale combustibile, il quale contribuisce allo sviluppo di fumi ed alla produzione di specie tossiche, oltre che incrementare le temperature delle strutture, con conseguente degrado delle loro proprietà meccaniche.

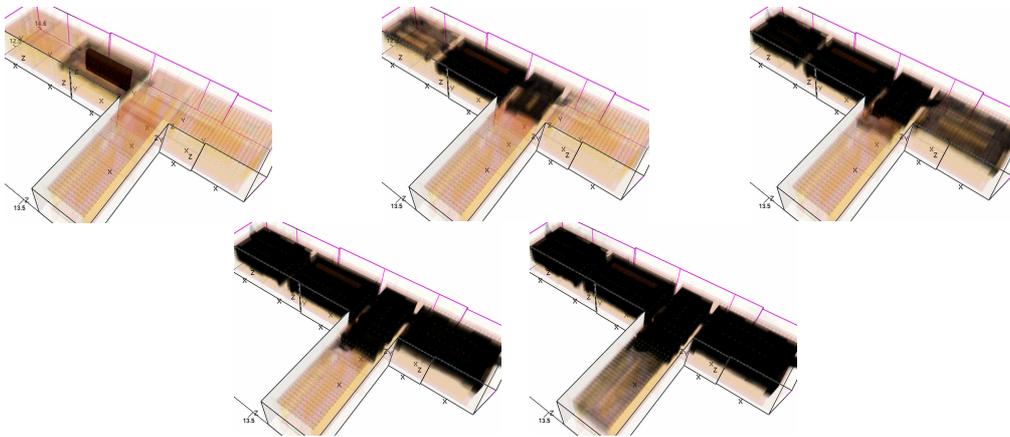


Figura 11. Propagazione dei fumi in diversi istanti temporali

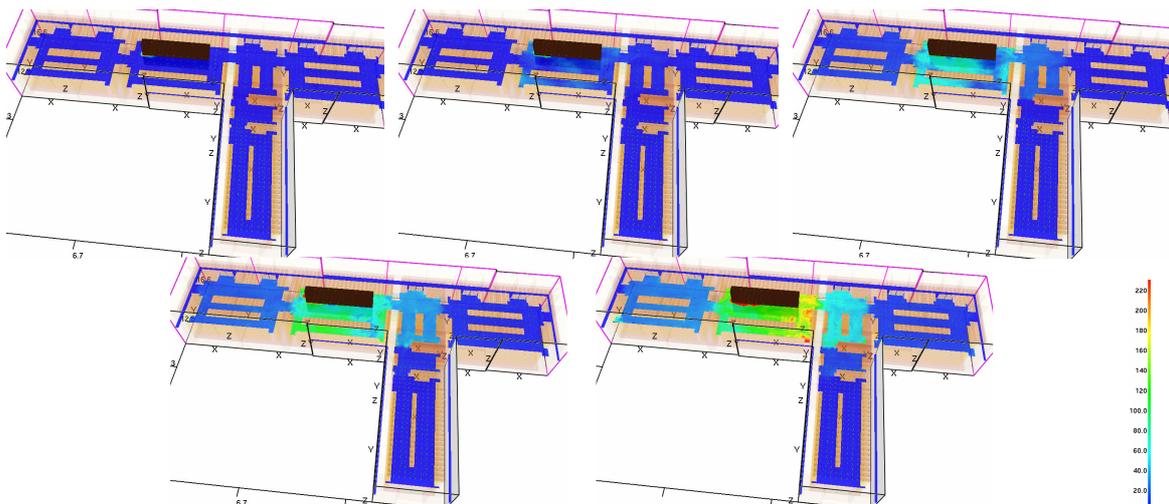


Figura 12. Evoluzione del campo di temperatura in diversi istanti temporali (fondoscala [°C]: 20 - 220)

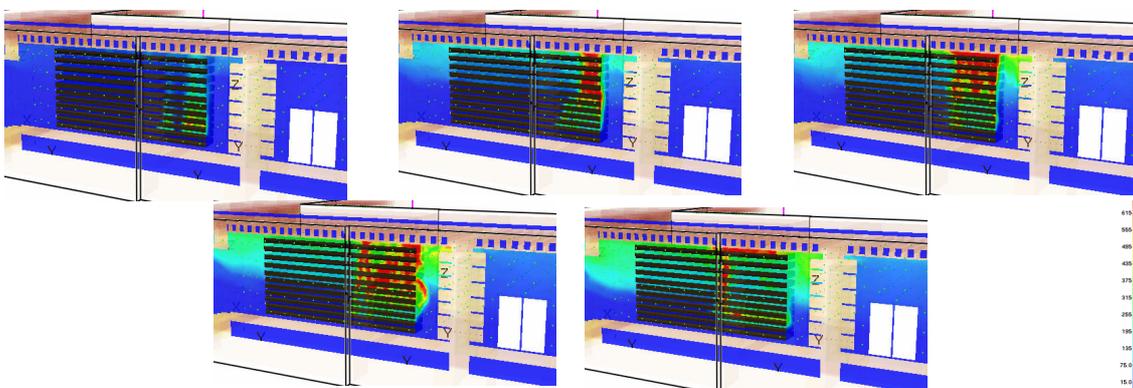


Figura 13. Evoluzione del campo di temperatura in diversi istanti temporali (fondoscala [°C]: 20 - 615)

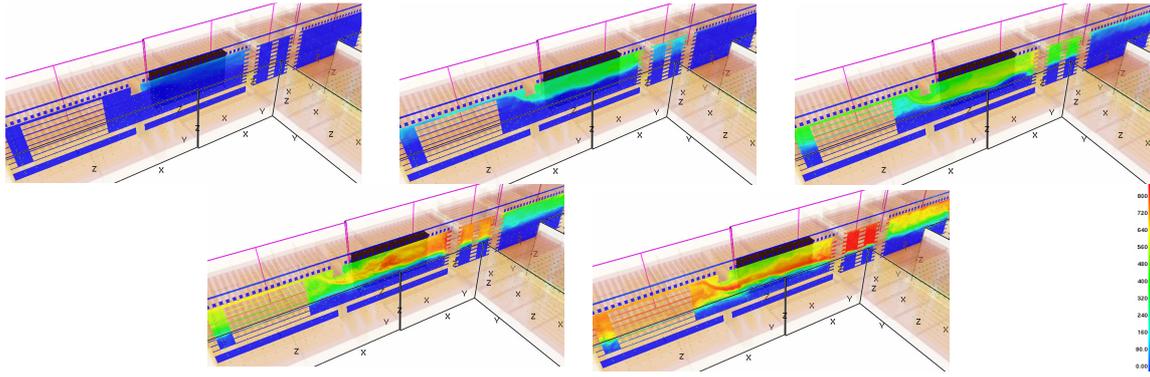


Figura 14. Quantità di particolato solido in diversi istanti temporali (fondoscala [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]: 0 - 800)

## 5.0 MODELLI COMPLEMENTARI SVILUPPATI

Sono stati sviluppati due modelli numerici complementari per il calcolo del flusso radiante e per l'analisi strutturale di materiali combustibili (travi in legno) facenti parte dell'apparato portante di un edificio storico. E' stata infine sviluppata una metodologia che consente di valutare la bontà dei risultati ottenuti in base a confronti con incendi reali e con le esperienze sul campo dei vigili del fuoco.

### 5.1 Teoria di base per il modello di irraggiamento

Il software CFD utilizzato mostra dei limiti nel calcolo del flusso radiante,  $q$ . Infatti, esso commette un certo errore (piccolo, se non addirittura trascurabile) nel calcolo della temperatura  $T$ ;  $q$  dipende dalla quarta potenza di  $T$ ; di conseguenza, anche un piccolo errore sul calcolo di  $T$  si traduce in un errore rilevante sul calcolo di  $q$ . Se  $T$  è bassa, tale errore può ritenersi ininfluenza poiché l'irraggiamento è trascurabile rispetto agli altri meccanismi di scambio termico. In caso di incendio, invece, le temperature raggiungono valori molto elevati e l'irraggiamento diventa il meccanismo di scambio termico principale; occorre, quindi, migliorare e/o correggere il calcolo di  $q$ . Per fare questo, sono disponibili diversi algoritmi interni al software la cui affidabilità dipende dall'impostazione di valori precisi per parametri molto specifici (larghezza di banda delle radiazioni da considerare, numero di angoli solidi discreti, etc.). Per ovviare a tale problema, si è ricorso ad un modello di irraggiamento esterno al software, che con esso si integri, e che sviluppi integrazioni "parallele" in maniera da avere due (o più) diversi sets di risultati che siano confrontabili fra loro.

Nel campo delle analisi degli incendi, l'anidride carbonica ed il vapor d'acqua sono i gas che possiedono le bande di emissione che influenzano maggiormente il fenomeno dell'irraggiamento. I flussi radianti all'interno di un ambiente in cui si sviluppa un incendio possono essere, quindi, calcolati a partire dalla conoscenza dell'emissività e del coefficiente di assorbimento di anidride carbonica e vapor d'acqua. Allo scopo, si consideri una massa di gas contenuta in un volume semisferico di raggio  $L$ , alla pressione parziale  $P_G$ , e si supponga di voler determinare lo scambio termico radiante tra il gas, alla temperatura  $T_G$ , ed un elemento di superficie di un corpo nero, alla temperatura  $T_S$ , posto al centro della base della semisfera. L'emissione, per unità di superficie, del gas è  $\sigma T_G^4 \epsilon_G$ , dove  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann ed  $\epsilon_G$  denota l'emissività del gas. L'assorbimento, da parte del gas, della radiazione termica proveniente dalla superficie è  $\sigma T_1^4 \alpha_{G1}$ , nella quale  $\alpha_{G1}$  rappresenta il coefficiente di assorbimento del gas per una radiazione proveniente da una sorgente alla temperatura  $T_1$ . L'emissività di un gas dipende da  $T_G$ ,  $P_G$ , dal prodotto  $P_G L$  e dalla pressione totale del gas  $P_T$ . L'emissività dell'anidride carbonica non dipende dalla sua pressione parziale e si calcola utilizzando correlazioni, ricavate da dati sperimentali, definite in [10] e [11], mentre l'emissività del vapore acqueo è fornita da correlazioni presenti in [12]. Il coefficiente di assorbimento è fornita da:

$$\alpha_{G1} = \epsilon_{G1} \left( \frac{T_G}{T_1} \right)^a, \quad (1)$$

dove  $\alpha_{G1}$  – coefficiente di assorbimento;  $\varepsilon_{G1}$  - emissività del gas valutata a  $T_1$  e a  $P_G L(T_1/T_G)$ ,  $T_G$  – temperatura del gas, K;  $T_1$  – temperatura della sorgente, K. L'esponente "a" dipende dal gas; per l'anidride carbonica vale 0.65 mentre per il vapore d'acqua vale 0.45. Quando si ha la presenza di due gas, l'irraggiamento totale è minore della somma dei due effetti separati; ognuno dei due gas ha, infatti, un certo grado di opacità rispetto all'altro. Se si considera, ad esempio, un gas formato da anidride carbonica e vapor d'acqua, l'emissività ed il coefficiente di assorbimento sono:

$$\varepsilon_G = \varepsilon_c + \varepsilon_w - \Delta\varepsilon, \quad \alpha_{G1} = \alpha_{c1} + \alpha_{w1} - \Delta\alpha \quad (2), (3)$$

dove  $\varepsilon_c$  – emissività dell'anidride carbonica;  $\varepsilon_w$  – emissività del vapor d'acqua;  $\alpha_{c1}$  – coefficiente di assorbimento dell'anidride carbonica;  $\alpha_{w1}$  – coefficiente di assorbimento del vapor d'acqua;  $\Delta\varepsilon$  e  $\Delta\alpha$  sono le riduzioni di cui prima, e si ricavano da dati sperimentali che dipendono da  $(P_c L + P_w L)$  e da  $[P_w / (P_c + P_w)]$ . Le relazioni introdotte in precedenza possono essere utilizzate nel caso in esame se vengono estese ad ambienti a forma di parallelepipedo. Per fare ciò è indispensabile introdurre il raggio medio L definito come il raggio di una semisfera di gas, la quale irradia un'area unitaria posta al centro della sua base, allo stesso modo dell'irraggiamento medio della massa effettiva di gas sulla superficie complessiva. Per i parallelepipedi il raggio medio L dipende anche dal gas e dal prodotto  $P_G L$ . Diversi valori di L si trovano tabulati in [13]. Lo scambio netto di calore per irraggiamento tra un gas contenente anidride carbonica e vapore acqueo e le superfici del contorno è:

$$\frac{q}{A} = \sigma(\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_{G1} T_1^4) \quad (4)$$

dove q – flusso di calore radiante, W; A – superficie, m<sup>2</sup>,  $\sigma$  - costante di Stefan-Boltzmann,  $5.67 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>;  $\varepsilon_G$  – emissività del gas;  $T_G$  – temperatura del gas, K;  $\alpha_{G1}$  coefficiente di assorbimento del gas, K;  $T_1$  – temperatura di una sorgente emittente, K. Nella (4) le temperature ed i coefficienti di irraggiamento rappresentano i valori medi sul volume e sulle superfici di contorno. Le previsioni istantanee dei flussi radianti fornite da FDS sono state confrontate con i risultati di questa metodologia, per stimare la qualità del modello di irraggiamento utilizzato. Nel caso qui analizzato, le differenze riscontrate tra i valori dei flussi radianti calcolati con FDS e quelli calcolati dal modello semplificato risultano dipendere dalla geometria del problema e dalla caratterizzazione termica dei materiali; nel caso qui analizzato, le differenze massime riscontrate sono risultate poco significative e comunque non tali da giustificare la ricompilazione delle routines, relative al calcolo dei parametri legati all'irraggiamento, interne ad FDS.

## 5.2 Analisi strutturale

Nella valutazione dell'impatto dell'incendio dal punto di vista strutturale sono state considerate le strutture lignee orizzontali presenti in alcuni locali di riferimento secondo quanto illustrato nella parte relativa al calcolo CFD utilizzato per la simulazione dello sviluppo dell'incendio stesso. Si sono fatte alcune ipotesi di base per i materiali coinvolti nell'analisi termo-strutturale, a causa della mancanza di informazioni specifiche (ad esempio nell'analisi dei carichi dei solai vi era incertezza sulla loro effettiva composizione in termini di spessori e materiali impiegati). Per le travature, il legno selezionato è di categoria C24 (classificazione per legno strutturale EN338, 1997) e le sue proprietà termiche e meccaniche sono state definite in accordo con le norme EN 1995-1-2 nella parte relativa ai "Modelli di calcolo avanzati" (Appendice informativa B), [14]. Per i calcoli termo-strutturali si è utilizzato un codice ad elementi finiti nato specificatamente per questo tipo di problematiche e messo a punto da "FSD International". Il codice oltre all'analisi termica, per la quale prende in considerazione sia condizioni al contorno radiative che convettive, effettua una analisi meccanica mediante un modello a fibre, il cui risultato principale è la valutazione della riduzione di capacità portante nel tempo.

Le simulazioni effettuate si ponevano come obiettivo principale quello di valutare la capacità portante residua delle travi delle strutture lignee interessate all'incendio, tenendo conto degli scenari descritti. Tale capacità è stata quindi confrontata con la sollecitazione esercitata dai carichi agenti sulla trave stessa in condizioni di normale utilizzo della struttura. Questo tipo di confronto ha portato ad una

stima del tempo necessario affinché durante l'evento incidentale la struttura arrivi al collasso. E' stato possibile altresì valutare la profondità di carbonizzazione della struttura in legno in condizioni differenti da quelle standard previste dalla normativa vigente in materia. Convenzionalmente si è considerato il materiale come carbonizzato una volta che avesse raggiunto una temperatura pari o superiore ai 300°C.

#### Risultati scenario B

Dal punto di vista strutturale questo scenario non ha portato risultati significativi, visti i modesti incrementi della temperatura previsti nel locale e le dimensioni delle travi presenti (la luce supera di poco i tre metri). Tutte le travi analizzate quindi presentano una riduzione della capacità portante inferiore al 5% con temperature che non eccedono i 100 °C all'estradosso delle travi stesse. Anche nel caso dell'incendio di normativa (ISO-Fire 834) la trave tipo, benché la sollecitazione termica sia decisamente più rilevante, non risulta mai prossima ad una situazione di collasso, dal momento che il momento flettente derivante dai carichi agenti risulta di entità limitata.

#### Risultati scenario A

Vengono ora descritti i casi relativi allo Scenario A per le tre tipologie di trave presenti nei tre locali interessati dall'incendio:

- Caso con curva temperatura-tempo ISO-Fire 834;
- Caso con le curve temperature-tempo fornite dall'analisi fluidodinamica.

In Figura 15a sono riportati gli andamenti temporali della temperatura dei gas caldi a contatto con l'estradosso delle travi (differenziate dimensionalmente a seconda del locale a cui appartengono) risultante dall'analisi termica.

Nel caso di riscaldamento con curva di normativa (ISO-Fire 834), l'andamento della temperatura superficiale delle travi è praticamente identico indipendentemente dalle loro sezioni. Ciò è normale considerando che le condizioni al contorno sono le medesime.

Come si nota la presenza del picco nelle curve temperatura-tempo di input, calcolate con il modello fluidodinamico, influenza notevolmente l'evoluzione della temperatura sulla superficie inferiore della trave. Tali differenze si riflettono poi a livello strutturale. In Figura 15b è possibile infatti osservare la riduzione della capacità portante nel tempo. In corrispondenza del picco termico si ha simultaneamente una riduzione abbastanza rapida della capacità portante in un intervallo temporale abbastanza limitato (6-8 minuti).

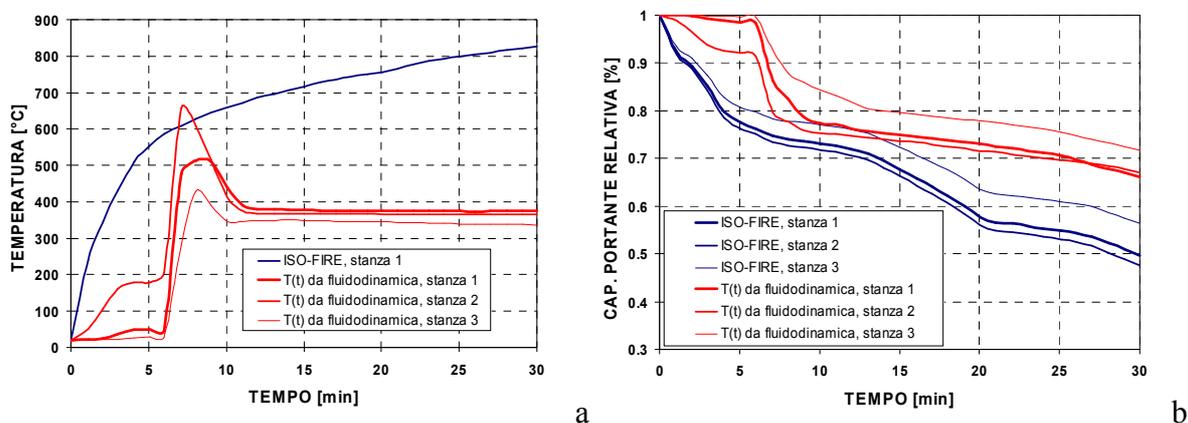


Figura 15. Andamento della temperatura superficiale delle travi nei casi analizzati (a), riduzione della capacità portante delle travi nei casi analizzati (b).

Le travi considerate, pur essendo costituite dal medesimo tipo di legno, presentano sezioni e lunghezze diverse e sono quindi sollecitate dai carichi esterni (oltre che dal peso proprio) in modo differente. Nel seguito sono riportati i risultati di una analisi dei carichi e delle sollecitazioni sulle tre tipologie di trave considerate. Tale valutazione è da intendersi come approssimativa in quanto non sono note esattamente le composizioni dei solai in termini di spessori e materiali, per cui si sono dovute fare delle assunzioni. In particolare si è supposto che gravi sulle travi il peso di una pavimentazione in "battuto veneziano" con uno spessore di circa 30 cm e un tavolato in legno. Vista la destinazione d'uso dei locali superiori si è deciso di considerare come sovraccarichi variabili quelli di categoria 9 (relativi

a biblioteche, archivi, magazzini, ecc.). Supponendo le travi come semplicemente appoggiate la sollecitazione massima si ha in mezzera e risulta essere pari a:

- trave stanza 1 25 kNm;
- trave stanza 2 25 kNm;
- trave stanza 3 30 kNm.

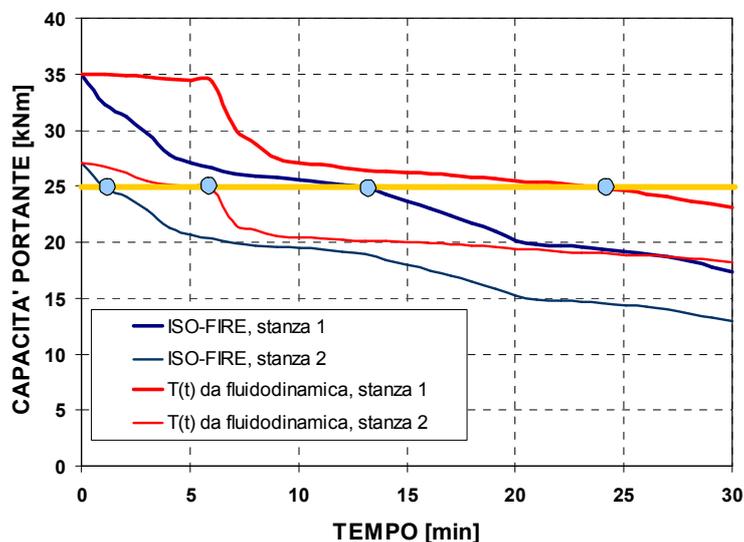


Figura 16. Andamento della capacità portante nel tempo per le tre tipologie di travi adottate soggette a incendio nei vari scenari previsti. I marcatori circolari indicano il tempo approssimativo di potenziale collasso della struttura soggetta ai carichi ipotizzati.

Nel caso delle travi della stanza 3 non ci sono problemi relativi al possibile collasso durante l'incendio entro i 30 minuti di simulazione previsti nelle analisi, qualunque sia lo scenario considerato. Al contrario, per le travi degli altri due locali in tutte e due le condizioni d'incendio analizzate e viste le sollecitazioni dovute ai carichi, si arriva a una situazione critica come evidenziato in Figura 16. Dai risultati riportati si possono stimare i tempi di collasso sintetizzati in Tabella 1.

Tabella 1. Schema sintetico dei tempi di collasso stimati per le strutture oggetto dell'indagine.

Struttura di riferimento	Scenario analizzato	
	Iso-Fire	Curve T(t) da fluidodinamica
Travi stanza 1	≈11÷12 min.	≈24 min.
Travi stanza 2	< 2 min.	≈ 6 min.
Travi stanza 3	Nessun collasso previsto nei 30minuti di analisi	

### Conclusioni

Come si può dedurre dai risultati presentati, la possibilità di poter simulare lo sviluppo di incendi di tipo diverso per potenza e ampiezza offre indirettamente notevoli passi avanti anche da punto di vista strutturale, consentendo l'analisi del comportamento delle strutture nei casi più diversi di carico termico. La variabilità del fenomeno è tale per cui si possono ottenere risultati notevolmente diversi con conseguenze facilmente immaginabili per le strutture. Se da un lato infatti, la curva temperatura-tempo di normativa sembra essere particolarmente gravosa, dall'altro è possibile si inneschino incendi la cui evoluzione porti a comportamenti che si discostano molto da quelli previsti dalle norme vigenti. E' sufficiente, ad esempio, che per un tempo sufficientemente prolungato ci sia un picco nelle temperature. Tale situazione, nel caso in cui la struttura si trovi già in una fase vicina a quella critica, può determinare una contrazione dei tempi di collasso. Questo tipo di condizione non può evidentemente essere analizzata se ci si continua a riferire solo ed esclusivamente a poche curve normative che si riferiscono a scenari ben precisi.

### 5.3 La CFD ed il soccorso.

L'uso della CFD consente la determinazione di informazioni importanti per gli operatori il soccorso. In particolare, quando la struttura sia storica, solo la modellazione della stessa con gli strumenti della Fire Safety Engineering può dare delle risposte quantitative a chi opera il soccorso. La tecnica che si adotta è la logica della funzione inversa: i calcoli delle grandezze termofluidodinamiche vengono svolti numericamente tenendo il tempo come variabile indipendente; in seguito, scegliendo opportunamente dei valori di soglia per le varie grandezze si può risalire all'istante in cui questi si presentano, determinando solitamente una qualche forma di crisi. In linea generale, i programmi CFD consentono il calcolo sia della diffusione, per via molecolare e di convezione, dei prodotti della combustione tipici della reazione in studio, sia delle distribuzioni di temperatura ed irraggiamento. Nel caso di queste seconde grandezze, inserendole come input per programmi di calcolo strutturale, si può arrivare fino a rivelare precocemente stati critici per le strutture. Dal punto di vista dei Vigili del Fuoco, il tempo necessario per portare una struttura a collasso per incendio costituisce il vincolo operativo di base. Il DPR 246/93 richiede, per la sicurezza in caso di incendio di un'opera, "[...] la possibilità per le squadre di soccorso di operare in condizioni di sicurezza [...]" e, questo, equivale a determinare il tempo di crisi. Essendo il concetto di resistenza al fuoco relativamente recente, la riserva di sicurezza della struttura storica in caso di incendio è il margine di sicurezza sullo stato dell'arte del calcolo strutturale all'epoca. Solo quindi l'uso della CFD e di software per la determinazione del danno consentono di determinare, a fronte dell'input particolareggiato, il tempo a disposizione dei soccorritori. In linea di massima, le strutture più critiche sono gli orizzontamenti lignei, sia per l'ipotesi di cedimento degli stessi sia per l'azione che il venir meno dei vincoli interni comporta per la parte rimanente della struttura. L'impalcatura di consolidamento delle mura perimetrali della Fenice né è un esempio. Sempre a titolo di esempio l'immagine del lento crollo della guglia lignea del Molino Stucky, che collassa su se stessa e si posa sul solaio sottostante, accorda a chi interviene dentro la possibilità di uscire. Diversamente dalla zona sili, in cui la perizia dei soccorritori, rilevata la presenza di struttura mista metallica e muratura, ha sconsigliato (giustamente) l'ingresso in una zona in odore di crollo con meccanica repentina. Il tempo di collasso di una struttura è purtroppo un limite estremo. Considerando l'obiettivo di tutelare la struttura ed i beni in essa contenuti senza volerli arricchire di nuova storia (in fin dei conti, le toppe con cui le suore coprono le bruciature sulla Sindone sono pur esse "storiche"), il calcolo va affinato con nuove quantità e soglie. In prossimità del focolaio va determinato l'irraggiamento a carico delle pareti e dei solai, e nulla osta già con i moderni codici di calcolo. La fase successiva presenta varie complessità: si tratta infatti di valutare l'azione dell'irraggiamento sui beni esposti, in quanto già l'evaporazione forzata dal calore incidente può causare l'invecchiamento repentino di una tela o di un tessuto; nel caso delle tele, l'essiccazione differenziale maggiore nelle zone scure, e quindi termoassorbenti, può indurre tensioni nella pittura. Il caso estremo è rappresentabile nell'incendio di impalcatura esterna della chiesa di San Geremia (1999), in cui il calore radiante ha inciso sulla facciata marmorea rovinando irreparabilmente le decorazioni lapidee, di cui restano tracce. Le soglie limite dell'irraggiamento vanno quindi drasticamente abbassate, e considerando l'analisi funzionale alla tutela di ciò che è inamovibile: non esiste dubbio che l'azione dei soccorritori, in termini di protezione passiva, passa prima di tutto dalla rimozione di tutto ciò che è mobile ed in tal senso, a livello di pianificazione dell'emergenza, la revisione critica delle modalità di fissaggio delle opere potrebbe aumentare drasticamente l'efficacia e quindi il successo del soccorso. Il valore di  $3 \text{ KW/m}^2$  per le lesioni reversibili alle persone da incendio stazionario appare già elevato per non nuocere ad opere lignee o pittoriche. Essendo i soccorritori protetti, gli stessi potranno agire come se nulla fosse in zone in cui i valori di irraggiamento siano anche superiori; non potendo però proteggere con il raffreddamento con acqua i beni esposti, a meno di schermature predisposte in tempo di pace, non esistono opzioni di protezioni in luogo di opere inamovibili. La loro protezione va attuata sul piano di prevenzione o di spegnimento precoce. Fortunatamente, l'irraggiamento è direzionale e quindi è già sufficiente un locale interposto perchè le pareti, se non molto riflettenti, costituiscano un labirinto schermante. Diversamente dall'irraggiamento, gli effetti di gas di combustione e fumo possono propagarsi a distanza anche notevole, in quanto l'energia trasmessa agli stessi promuove moti convettivi intensi. Ma l'effetto, fortunatamente, è ridotto: infatti, a parte il locale ove si sviluppa il principio di incendio, nel quale la concentrazione delle specie tossiche e del fumo sono al picco, la miscelazione con l'aria nei locali contigui ne attenua gli effetti. Ciò consente una possibilità operativa nuova: attraverso formazione ed

addestramento ad un buon livello, il personale di sala può contribuire alla messa in sicurezza delle opere; infatti nei locali ove l'incendio non è presente, la protezione di un operatore può essere efficacemente attuata attraverso una maschera a filtro, lasciando l'autoprotettore ai soccorritori professionali in zona rossa. Resta inteso che lo scenario possibile è quello di incendio "intrinseco" dell'attività, che presuppone cioè la produzione di fumi legati alla combustione di materiali naturali, con relativi ratei. In tal senso l'incendio ai grandi magazzini Coin, in cui nel 1986 perirono nel 5 persone, rappresenta una situazione limite che in una struttura storica si realizzerebbe con difficoltà: l'applicazione di rivestimenti con mastici emettenti vapori infiammabili, contestualmente al deposito di bobine di cavo elettrico, il tutto con la presenza di pubblico, è meno credibile nel caso della struttura storica. Bisogna però rilevare che la struttura dei grandi magazzini, al tempo, presentava una caratteristica comune a tutte le strutture storiche: l'assenza di compartimentazione. Con le modalità di ricerca esposte, i risultati dei calcoli operati con la CFD possono fornire ai soccorritori informazioni importanti per la pianificazione dell'emergenza. Il contributo chiave però, nelle prime fasi dell'emergenza, può provenire solo dal personale di sala; affiancato allo sviluppo dei software per la valutazione dell'impatto sulle opere, è necessario coinvolgere gli esperti del settore per poter valutare al meglio la modalità operativa di messa in sicurezza dei beni e per predisporre tutti i dispositivi necessari per la rapida movimentazione. Raggiunti questi primi obiettivi, si potrà passare ad un capitolo ulteriore, cruciale: la scelta delle modalità di protezione e degli estinguenti.

## **6.0 CONCLUSIONI**

Obiettivo principale della modellazione descritta nella presente relazione è stato quello di sviluppare e validare una metodologia per affrontare le problematiche relative alla sicurezza antincendio in edifici storici, in particolare adottando i metodi riguardanti l'approccio ingegneristico, considerando quanto stabilito dal D.M. 09.05.07. La metodologia delineata si basa, dunque, su diversi aspetti legati a ricerche bibliografiche di dati relativi ad incendi in edifici storici, analisi del rischio in base ad algoritmi probabilistici e a ulteriori valutazioni e considerazioni basate sulle esperienze dei VV.F., e simulazioni numeriche per studiare, analizzare e quantificare tutti gli aspetti legati alla termo-fluidodinamica dell'incendio. E' naturale che la metodologia non permetta di creare uno strumento che dia dei risultati semplicemente settando opportunamente dei parametri in input, poiché ogni edificio storico ha la sua conformazione, la sua morfologia, ed i suoi vincoli, che lo rendono diverso da tutti gli altri. La metodologia deve, quindi, essere pragmatica e capace di adattarsi alle diverse situazioni ed ai diversi problemi che si vanno ad affrontare. In particolare, nel caso in esame, la conformazione del territorio veneziano, e gli edifici presenti nella città, rendono Venezia particolarmente soggetta a pericoli di incendio che poi possono tradursi in danni notevoli (basti pensare ad esempio al Teatro della Fenice), anche a causa del difficile accesso per le squadre dei VV.F.. Per questo motivo è stata scelta Venezia come inizio per la ricerca, in modo da considerare tutti i parametri che in qualche modo devono essere coinvolti nella metodologia che si va a delineare. Di particolare importanza risulta essere la ricerca di dati statistici e di databases che catalogano incendi passati, in quanto l'analisi dei dati raccolti può fornire indicazioni su quali potrebbero essere le cause principali di innesco, su come potrebbe evolversi l'incendio e, soprattutto, tali dati potrebbero essere di notevole aiuto nel momento in cui si va a pianificare un sistema di emergenza in caso di incendio e a definire un progetto antincendio, in quanto permettono di valutare il parametro importantissimo costi/benefici. La collaborazione con i VV.F. e l'analisi topologica del territorio devono fornire risposte in merito a tempistiche di azione delle squadre di soccorso e capacità o meno di gestire fuochi in funzione dell'estensione o del tipo di combustione. La CFD è un pregevole strumento, compreso nella metodologia sviluppata, che consente di valutare i danni nelle prime fasi dell'incendio, peraltro fondamentali, negli edifici quali, ad esempio, musei e teatri che sono presidiati dalle squadre di soccorso. La CFD infatti fornisce i campi di temperatura, visibilità, concentrazione delle specie tossiche, flussi radianti e di convezione, ma non contempla la previsione, ad esempio, di quale possa essere l'innesco verosimile più probabile o la valutazione della generalizzazione dell'incendio. Questi ultimi due punti sono, infatti, cruciali per l'affidabilità e l'attendibilità dei risultati in output dalle simulazioni numeriche, ma per determinarli in maniera ottimale occorrono ricerche, analisi ed esperienza. Gli strumenti disponibili oggi di fluidodinamica numerica, adatti allo studio della dinamica evolutiva di un incendio, non sono tuttavia esaustivi per il calcolo di tutti i parametri associati con un rilascio di potenza termica in seguito ad una reazione di ossidazione di un materiale combustibile. Per

questo sono stati definiti ed ottimizzati modelli/strumenti o metodi per valutare un particolare aspetto od un particolare fenomeno fisico. Come affermato nei paragrafi precedenti, nel caso in esame questo si traduce nello studio della chimica di una reazione che può avvenire in un edificio storico, con materiali particolarmente pericolosi quali legno, carta o paglia, nello studio e nell'analisi dettagliata dei flussi radianti che possono andare a rovinare irrimediabilmente opere d'arte o strutture, e nello studio di metodologie di analisi strutturale ottimizzate per i materiali e le configurazioni presenti in edifici storici. Secondo quanto previsto dal "Codice dei beni culturali e del paesaggio", decreto legislativo n. 42/2004, all'art. 3 deve essere garantita la protezione e la conservazione dei beni costituenti il patrimonio culturale al fine della pubblica fruizione; la protezione del patrimonio culturale dal rischio incendio deve quindi ottemperare a due esigenze alle volte contrastanti:

- la sicurezza; l'incendio storicamente è stata una delle maggiori cause della perdita totale o parziale di beni culturali;
- la conservazione; le opere di protezione attiva e/o passiva dal rischio incendio risultano alle volte invasive e la loro installazione può compromettere l'integrità materiale del bene culturale.

Si tratta pertanto di trovare un giusto punto di equilibrio fra le due diverse esigenze, che garantisca da un lato la massima conservazione del bene, con il minor impatto architettonico e la minima perdita materiale, e dall'altro la massima sicurezza. La strada fino ad ora seguita era quella della possibile deroga dalla stretta normativa antincendio, applicando il principio della sicurezza equivalente, da garantire con mezzi ed opere di protezione alternative che fossero meno invasive. Ciò che però non risultava fino ad oggi valutabile era una quantificazione in termini reali della sicurezza che si riusciva ad ottenere applicando tale metodologia. Lo studio della dinamica evolutiva dell'incendio in edifici storico monumentali, qui presentato, riesce a superare questo limite e a simulare gli effetti e le conseguenze sia sull'immobile sia sulle opere in esso contenute. Questo costituisce un fondamentale passo in avanti per la conservazione dei beni culturali, in quanto, con tale strumento risulta possibile individuare i sistemi di protezione più efficaci, ottimizzare il loro utilizzo riducendo gli impatti sulle strutture architettoniche. I risultati della metodologia descritta in questo paragrafo sono stati mostrati nei paragrafi precedenti, per cui non si andrà più nel dettaglio; è doveroso, tuttavia, fare un'ultima osservazione riguardante l'utilizzo dei risultati. Essi, infatti, devono essere visti non come punto di arrivo di una metodologia che termina con analisi numeriche fluidodinamiche, ma devono essere visti come punto di partenza per conoscere i rischi, i pericoli e le probabilità che hanno di avere luogo, al fine di conoscere perfettamente quali potrebbero essere i danni provocati da tutti i possibili incendi e le misure da applicarsi per scongiurare il loro accadimento. La conoscenza di un possibile pericolo, tuttavia, non garantisce che esso possa essere contrastato, né tantomeno che possa essere contrastato in maniera efficace. Tuttavia, la non conoscenza di un possibile pericolo, garantisce invece che questo sicuramente non potrà in alcun modo mai essere contrastato.

## RIFERIMENTI

- [1] Babrauskas, V., Heat Release Rates in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Di Nenno, P.J., Drysdale, D., Beyler, C.L., Douglas Walton, W., Custer, R.L.P., Hall, J.R.Jr., Watts, J.M.Jr., Eds.), National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2002, p. 3-1.
- [2] Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, CEN, 2002.
- [3] Tewarson, A., Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Di Nenno, P.J., Drysdale, D., Beyler, C.L., Douglas Walton, W., Custer, R.L.P., Hall, J.R.Jr., Watts, J.M.Jr., Eds.), National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2002, p. 3-82.
- [4] Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, 1999, John Wiley & Sons, Chichester, England.
- [5] Karlsson, B. and Quintiere, J.G., Enclosure Fire Dynamics, 2000, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.

- [6] A. Tewarson, F.H. Jiang, and T. Morikawa, Ventilation-Controlled Combustion of Polymers, *Combustion and Flame*, 95, 1993, pp. 151–169.
- [7] Watts, J.M.Jr. and Hall, J.R.Jr, Introduction to Fire Risk Analysis in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Di Nenno, P.J., Drysdale, D., Beyler, C.L., Douglas Walton, W., Custer, R.L.P., Hall, J.R.Jr., Watts, J.M.Jr., Eds.), National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2002, p. 5-1.
- [8] Hall, J.R.Jr, Ahrens, M.J., Data for Engineering Analysis in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Di Nenno, P.J., Drysdale, D., Beyler, C.L., Douglas Walton, W., Custer, R.L.P., Hall, J.R.Jr., Watts, J.M.Jr., Eds.), National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2002, p. 5-65.
- [9] Meacham, B.J., Building Fire Risk Analysis in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Di Nenno, P.J., Drysdale, D., Beyler, C.L., Douglas Walton, W., Custer, R.L.P., Hall, J.R.Jr., Watts, J.M.Jr., Eds.), National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2002, p. 5-153.
- [10] Hottel, H.C., Mangelsdorf, H.G., Heat transmission by radiation from nonluminous gases. Experimental study of carbon dioxide and water vapor, *Transactions of American Institute of Chemical Engineers*, No. 31, 1935, pp. 517-549.
- [11] Hottel, H.C., Egbert, R.B., Radiant heat transmission from water vapor, *Transactions of American Institute of Chemical Engineers*, No. 38, 1942, pp. 531-565.
- [12] McAdams, W.H., Smith, V.C., *Transactions of ASME*, No. 57, 1935, 463-470.
- [13] Hottel, H.C., Radiant heat transmission in *Heat transmission* (McAdams, W.H., Eds.), 1954, McGraw-Hill, New York.
- [14] Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design, CEN, 2002.