

# **DEFINIZIONE E SIMULAZIONE DEGLI SCENARI DI INCENDIO DI PROGETTO NELLA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA ANTINCENDIO CON METODI PRESTAZIONALI NEGLI EDIFICI DI INTERESSE STORICO ARTISTICO**

Gabriele Ballocco\*, Tatiana Campioni<sup>o</sup>, Francesco Canali<sup>^</sup>, Andrea Carpignano\*, Luca Nassi<sup>#</sup>

\* Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, Torino

<sup>o</sup> Direzione Tecnica S. Maria della Scala, Piazza Duomo 2, Siena

<sup>^</sup> Studio Canali Associati, Via Tetrarca 9, Parma

<sup>#</sup> Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Siena, Viale Cavour 163, Siena

[gabriele.ballocco@polito.it](mailto:gabriele.ballocco@polito.it)

## **SOMMARIO**

La memoria affronta i problemi connessi all'applicazione dei metodi prestazionali ai fini della sicurezza antincendio, con riferimento agli edifici di interesse storico artistico focalizzando in particolare gli aspetti legati alla selezione e alla modellazione degli scenari di incendio che costituiscono un punto cruciale nell'ambito del processo prestazionale. E' inoltre illustrata una parte del lavoro di analisi condotto nell'ambito del progetto di recupero di un antico complesso monumentale, lo Spedale Santa Maria della Scala, a Siena. In particolare, si è voluto confrontare fra loro i risultati da due programmi di calcolo per la modellazione dello sviluppo e la propagazione di un incendio all'interno di un edificio: il modello a zone implementato nel codice CFAST e il modello di campo contenuto in FDS, entrambi sviluppati dall'ente statunitense NIST. Tale confronto, nel contesto del vasto studio in corso al Santa Maria della Scala, deve consentire di comprendere le migliori condizioni d'impiego dell'uno e dell'altro modello in un contesto ambientale particolare come quello del complesso monumentale medioevale.

## **2. INTRODUZIONE**

Nell'ambito dell'ingegneria antincendio, l'opportunità di applicare regolamenti di tipo prestazionale, basati cioè sulla verifica del raggiungimento di predeterminati obiettivi di sicurezza, in luogo di approcci di tipo prescrittivo, è ormai largamente riconosciuta e documentata da una vasta letteratura. Malgrado questo orientamento generale, sussistono ancora delle difficoltà evidenti nell'applicazione diffusa dei metodi prestazionali, dovute a diversi fattori tra i quali è da sottolineare la scarsa diffusione e conoscenza di procedimenti di valutazione e di calcolo che consentono un approccio ingegneristico ai problemi di prevenzione incendi. In particolare, la difficoltà maggiore consiste nel creare e consolidare un vero patrimonio culturale e scientifico comune, a disposizione di tutti i tecnici che operano nel settore, che consenta di effettuare valutazioni tecniche oggettive riguardo i fenomeni da considerare nel campo della progettazione della prevenzione incendi. In tale prospettiva, lo studio di quel particolare fenomeno fisico-chimico che è l'incendio acquista, evidentemente, rilevanza fondamentale. E' pur vero che tale fenomeno è assai complesso ma le numerose sperimentazioni condotte, le conseguenti formulazioni empiriche di cui è ormai comprovata l'affidabilità ed infine la risorsa offerta da alcuni affidabili codici di calcolo, consentono un efficace approccio ingegneristico. L'approccio prestazionale ai temi della prevenzione incendi, cioè la disciplina nota nel mondo anglosassone con il termine di "fire engineering", si riduce quindi ai seguenti passaggi chiave:

- conoscenza degli aspetti fisico-chimici dei fenomeni di incendio.
- analisi, nelle specifiche condizioni del caso in esame, dei parametri significativi che governano l'incendio stesso, anche con l'ausilio di tecniche e metodologie di analisi del rischio;
- modellazione dell'incendio (simulazione di scenari di incendio) e successivo esame dei risultati
- individuazione di accorgimenti progettuali e gestionali o apprestamento di dispositivi in grado di assicurare il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza prefissati.

I passaggi fondamentali di un processo di progettazione prestazionale sono più propriamente descritti nel seguito (vd. 3.) ma quanto appena riassunto costituisce il nocciolo del metodo, la sostanza dell'approccio.

## **3. METODI PRESTAZIONALI**

La progettazione antincendio con metodi prestazionali può essere definita come un processo

ingegneristico mirato alla prevenzione e protezione incendi basato sulla definizione di obiettivi di sicurezza, sull'analisi probabilistica e deterministica degli scenari di incendio e sulla comparazione di diverse soluzioni progettuali con criteri quantitativi alla luce degli obiettivi prefissati, secondo un processo di analisi quantitativa che si avvale di strumenti e metodologie di comprovata validità.

Con maggiore dettaglio, le fasi in cui si articola il processo sono le seguenti [7]:

- definizione dello scopo del progetto (project scope) e cioè delle caratteristiche generali della struttura che si intende realizzare (tipo di edificio, soggetti interessati, numero e caratteristiche degli occupanti, normativa rilevante);
- definizione degli obiettivi di sicurezza antincendio (goals for fire safety) di interesse per la proprietà e loro priorità (es. assicurare la sicurezza delle persone destinate ad occupare l'edificio e del personale di emergenza minimizzando il numero dei feriti in caso di incendio, minimizzare i danni materiali alla proprietà e al patrimonio culturale, assicurare la continuità della funzione a cui la struttura è preposta, limitare i danni sull'ambiente);
- definizione degli obiettivi della proprietà e del progetto (stakeholder and design objective) dove viene dettagliato quanto definito al punto precedente in termini di numero di vittime e feriti, danni economici o altri parametri quantificativi del danno sulle persone, sulle strutture e sull'ambiente;
- definizione dei criteri di accettabilità (performance criteria) che garantiscono il raggiungimento degli obiettivi di cui al punto precedente, attraverso parametri calcolabili quali valori di temperatura di soglia per i materiali, di concentrazione di CO, di visibilità, etc.;
- selezione degli scenari di incendio (fire scenarios) con cui valutare la conformità del progetto;
- sviluppo dei progetti di prova (trial designs) caratterizzati da diversi sistemi per la prevenzione e la protezione, volti a garantire il soddisfacimento degli obiettivi.

A questo punto è bene che il progettista produca una nota che riassume lo scopo, gli obiettivi, i criteri di accettabilità adottati, i progetti preliminari e gli scenari di incendio selezionati e i metodi di analisi adottati o che si intende adottare da sottoporre alla revisione della proprietà.

Seguono quindi le fasi di:

- valutazione dei progetti di prova, in cui ognuno dei progetti di prova viene valutato in base agli scenari di incendio selezionati e alla luce degli scopi e degli obiettivi prefissati;
- selezione del progetto finale;
- produzione della documentazione necessaria affinché le specifiche progettuali siano implementate e mantenute correttamente.

#### **4. BENEFICI DERIVANTI DALL'UTILIZZO DEI METODI PRESTAZIONALI**

I principali benefici ottenibili attraverso l'applicazione di metodi prestazionali consistono nella possibilità di:

- prendere in considerazione gli aspetti di unicità di un edificio;
- tenere conto delle specifiche esigenze della proprietà (che in molti casi non sono contemplate dai regolamenti prescrittivi) e della collettività;
- comparare diverse soluzioni progettuali alla luce dei requisiti di sicurezza prefissati;
- produrre soluzioni progettuali innovative;
- sviluppare una strategia di protezione e prevenzione incendi in cui i sistemi antincendio sono integrati nel progetto globale, e non progettati separatamente.

Al fine di ottenere i maggiori benefici in termini di maggiore sicurezza contro gli incendi, scelta di soluzioni progettuali d'avanguardia e minimizzazione del rapporto costi/benefici, è opportuno che il processo prestazionale di progettazione antincendio affianchi fin dall'inizio la progettazione degli edifici. In ogni caso, i metodi prestazionali possono essere proficuamente applicati anche ad edifici già esistenti (come gli edifici di interesse storico-artistico).

#### **5. EDIFICI DI INTERESSE STORICO ARTISTICO**

Gli edifici di interesse storico artistico sono soggetti ai controlli periodici di prevenzione incendi di cui alla legge 966/65, in quanto contemplati al punto 90 dell'elenco allegato al D.M. 16-02-82. La normativa tecnica rilevante in materia è stata emanata dal Ministro per i Beni Culturali ed Ambientali di concerto con il Ministro dell'Interno con i regolamenti contenuti nel D.M. 20/5/92, n.569 concernente le norme di sicurezza antincendio per gli edifici storici e artistici destinati a musei, gallerie, esposizioni e mostre e il D.P.R. 30/6/95 n. 418 concernente le norme di sicurezza antincendio per gli edifici di interesse storico artistico destinati a biblioteche ed archivi. L'approccio di tali norme è sostanzialmente prescrittivo sebbene sia stata

superata la concezione prevalentemente deterministica per lasciare spazio a scelte alternative utili ad assicurare idonei livelli di protezione agli edifici in questione rispettando nel contempo le esigenze di tutela dell'integrità strutturale originaria e di salvaguardia dei beni contenuti negli edifici stessi. Entrambe le norme riconoscono infatti che qualora sussistano comprovate ragioni di carattere tecnico o specifiche esigenze di tutela dei beni può essere formulata una domanda di autorizzazione a realizzare impianti difformi da quelli prescritti.

Lo studio dei sinistri avvenuti in edifici di interesse storico artistico conferma un'elevata vulnerabilità agli incendi di questi edifici, in conseguenza di diversi fattori, dei quali i più ricorrenti risultano essere la presenza di strutture lignee, la mancanza di adeguate compartimentazioni antincendio, gli elevati carichi d'incendio per l'abbondante presenza di materiali combustibili, la carenza di adeguate procedure di organizzazione e gestione della sicurezza, e di informazione del personale dipendente in materia di sicurezza antincendio e di gestione dell'emergenza.

Tale vulnerabilità ha fatto registrare, oltre ad un'elevata frequenza di incendi negli edifici in questione, anche gravi conseguenze in termini di danni incommensurabili alle strutture ed ai beni in esse contenuti, sia in Italia che all'estero. Si deve aggiungere che diversi incendi si sono verificati in concomitanza alla presenza di cantieri temporanei per lavori di restauro; tale circostanza, che spesso comporta la riduzione dei livelli di sicurezza, ha contribuito all'amplificazione delle conseguenze dell'incendio. In ultimo non possono essere sottaciute le difficoltà di intervento per i soccorritori correlate alla complessità planovolumetrica ed architettonica che spesso caratterizza gli edifici in questione [14].

Il carattere di forte singolarità che caratterizza gli edifici di interesse storico-artistico, li rende particolarmente adatti ad essere oggetto di metodi prestazionali per la progettazione antincendio. Considerando infatti la necessità di operare minime alterazioni nella struttura degli edifici preservandone l'originalità, è probabile che si manifesti l'impossibilità di ottemperare completamente alle norme prescrittive.

## **6. VALUTAZIONE DELLA CONFORMITÀ DEL PROGETTO AGLI OBIETTIVI DI SICUREZZA FISSATI ATTRAVERSO LA SIMULAZIONE DEGLI SCENARI DI INCENDIO**

Ferma restando l'importanza di ciascuno dei passi di cui si compone il processo di progettazione secondo metodi prestazionali e la necessità di ottemperare ad ognuno di essi, è innegabile come un punto cruciale della procedura sia la scelta e la modellazione degli scenari di incendio. Questo vale a maggior ragione per gli edifici di interesse storico artistico; tali strutture sono infatti caratterizzate da una grande variabilità nei parametri che condizionano l'ingegneria antincendio, soprattutto per il fatto che sono spesso sede di esposizioni temporanee che si succedono nel tempo, sono interessati da cantieri di restauro e presentano una complessità geometrica particolare. Queste caratteristiche accentuano, rispetto all'applicazione ad edifici comuni, la difficoltà nel definire con precisione lo scenario di incendio e nell'identificare il modello di simulazione più adatto.

Al fine della definizione degli scenari di incendio, sostanziale supporto all'analista deriva dalla norma NFPA 914, il cui aspetto di maggiore interesse riguarda proprio l'identificazione degli scenari rispetto ai quali deve essere svolta la verifica dell'edificio [2]. Questi scenari sono gli otto, che costituiscono il numero minimo di situazioni che la norma NFPA 101 prevede per l'analisi prestazionale. Nel caso delle risorse culturali, a questi otto scenari se ne associano altri quattro che, modellati sulla base di alcuni del primo gruppo, sono destinati ad evidenziare l'esposizione del materiale agli effetti dell'incendio.

Per la simulazione degli incendi previsti nei vari scenari il progettista può avvalersi di una grande varietà di strumenti tenendo presente che il modello deve essere fornito di una guida tecnica che includa una descrizione dettagliata delle relazioni fisiche e chimiche, con i relativi riferimenti di letteratura e una lista di tutte le limitazioni e le assunzioni di base del modello e la stima delle predizioni basata sul confronto con dati sperimentali. [2] Nella grande varietà di modelli disponibili si possono identificare tre gruppi principali [8].

- Modelli mono-zona: sono stati utilizzati nel campo dell'ingegneria strutturale principalmente per predire condizioni di post-flashover in un singolo compartimento. Questi modelli assumono il locale in cui si sviluppa l'incendio come un'unica zona in cui i valori di temperature e degli altri parametri significativi sono uguali in ogni punto. Non forniscono una buona approssimazione delle prime fasi dell'incendio.
- Modelli a zone: suddividono ogni locale in un piccolo numero di volumi di controllo (chiamati "layer"), lo stato di ognuno dei quali è ipotizzato uniforme al suo interno, cioè i valori di temperatura, quantità di fumo, concentrazione dei prodotti della combustione sono uguali in ogni punto dello stesso volume.
- Modelli fluidodinamici forniscono la stima dell'evoluzione dell'incendio in uno spazio per via

numerica, risolvendo le equazioni di conservazione (della massa, dell'energia, della diffusione delle specie ecc.) che risultano da un incendio. Questo approccio è sviluppato attraverso i metodi agli elementi finiti, o meglio, ai volumi finiti. Così come per i modelli a zone, i modelli di campo richiedono la descrizione del compartimento e delle aperture, ma in realtà permettono di simulare anche spazi non compartimentati, come i plume (cioè il pennacchio di fiamme e gas caldi che si eleva dalla regione di combustione) ed i camini.

Qualunque sia il lo strumento che si intende utilizzare è di fondamentale importanza sottolineare che i modelli di incendio sono utilizzati per la previsione delle condizioni ambientali durante un incendio forniscono una serie di informazioni utili per la progettazione; dal momento che, però, essi sono inevitabilmente affetti da errore, se una struttura è progettata in accordo con risultati da essi prodotti, il progetto stesso sarà affetto da un errore. Una sottostima della gravità delle conseguenze dell'incendio può portare a soluzioni progettuali che non garantiscono la sicurezza delle persone mentre risultati troppo conservativi possono portare ad una spesa inutilmente onerosa. Per questo motivo, è importante poter valutare correttamente l'incertezza associata ai risultati. D'altro canto la necessità di svolgere analisi di sensitività sui dati di input e di incertezza sul modello utilizzato, che possono essere tradotti in fattori correttivi dei risultati ottenuti, è palese nell'ambito del processo di progettazione con metodi prestazionali ed è riconosciuta dalla norma NFPA914 al punto 6.7.1.

## **7. CFAST E FDS**

Prescindendo dai modelli mono-zona, che sono di scarsa utilità per i problemi in esame, la scelta deve ricadere sulle altre due categorie. In questo lavoro si prendono in esame i software FDS e CFAST, entrambi sviluppati dai gruppi di ricerca del BFRl (Building and Fire Research Laboratory) del NIST (National Institute of Standards and Technology) degli Stati Uniti, che rappresentano rispettivamente gli esempi più noti di modello a zone e modello fluidodinamico. I due software sono caratterizzati da un grado di dettaglio modellistico molto differente, dal momento che CFAST adotta una semplificazione molto più spinta del fenomeno fisico. A fronte di ciò, essi richiedono d'altra parte un costo molto diverso soprattutto in termini di tempo necessario per portare a termine la simulazione.

### **7.1. CFAST [6]**

Il modello di simulazione contenuto in CFAST è un modello a zone in grado di predire le condizioni ambientali in una struttura composta da più compartimenti e soggetta all'incendio. La versione utilizzata per effettuare le simulazioni nell'ambito di questo studio è la numero 3.1.7 dell'Ottobre 2001.

In qualità di modello a zone, CFAST suddivide i compartimenti in due layer, i quali rappresentano la parte bassa e quella alta di una stanza, all'interno della quale le condizioni possono variare solamente in senso verticale tra pavimento e soffitto, e rimangono costanti sullo stesso piano orizzontale.

Il funzionamento dell'algoritmo contenuto nel software è basato sulla risoluzione di equazioni che predicono le variabili di stato (pressione, temperatura, ecc.) basandosi sulla conoscenza dei flussi di calore e di massa per ogni istante di tempo. In CFAST l'incendio è considerato come una sorgente di combustibile rilasciata con una determinata velocità. La combustione può avere luogo sia nella zona bassa che in quella alta all'interno di un compartimento; in ogni caso vi deve essere presenza di ossigeno.

Sopra ogni oggetto che brucia, si forma una fiamma che non viene considerata facente parte di alcun layer, ma come una pompa che spinge il calore e la massa dalla zona sottostante a quella in alto. Sono due le cause di tale movimento ascensionale: il primo è la fiamma stessa, la seconda è il flusso d'aria proveniente dalle aperture quali porte e finestre ma anche da aperture poste sul pavimento o sul soffitto dei locali.

CFAST tiene conto dei trasferimenti di calore che avvengono con la struttura in esame e permette di selezionare diversi tipi di materiale che caratterizzano pareti, pavimento, e soffitto. Il modello consente all'utente di definire tutti i parametri che caratterizzano l'incendio da simulare e in particolare la curva di rateo di rilascio di calore; esiste comunque un database di incendi standard che comprende anche le caratteristiche di alcuni oggetti di uso comune.

Il risultato fornito da CFAST consiste negli andamenti nel tempo (per la durata della simulazione), dei parametri che caratterizzano gli effetti dell'incendio ed in particolare della quantità di fumi prodotti, delle temperature e delle concentrazioni delle specie chimiche.

### **7.2. FDS [1]**

Il modello di simulazione contenuto nel software FDS è un modello di tipo CFD (Computational Fluid

Dynamics) e rientra nella categoria dei modelli cosiddetti “di campo”. La versione utilizzata per effettuare le simulazioni nell’ambito di questo studio è la dell’Aprile del 2003.

Per quanto riguarda il modello idrodinamico, gli algoritmi contenuti nel software risolvono numericamente, per ogni cella del dominio di calcolo, le equazioni di Navier-Stokes in forma appropriata per flussi termici a bassa velocità, con un’enfasi sul trasporto dei fumi e del calore derivanti dall’incendio. Il modello di combustione è del tipo “Mixture Fraction”. La frazione di miscela è una quantità scalare, che è definita come la frazione di gas in un determinato punto del campo di flusso che è originato dal combustibile.

La simulazione di un incendio mediante il modello di FDS può avvenire impostando una curva di rilascio di calore predefinita o definendo le caratteristiche termo-fisiche e chimiche del materiale che brucia quali la densità, il calore di vaporizzazione, la temperatura di ignizione, il calore di combustione, le caratteristiche stechiometriche delle reazioni di combustione. Questo secondo metodo prevede che il materiale, sottoposto ad un determinato flusso di calore, vaporizzi e i relativi gas si inneschino alla temperatura di ignizione prefissata, reagendo secondo i rapporti indicati dal tipo di reazione predefinita. Fra gli svantaggi insiti nella metodologia di definizione dell’incendio descritta si evidenzia una possibile sovrastima del calore rilasciato e la necessità di definire le proprietà termofisiche e chimiche di un unico materiale “virtuale”, che rappresenti la moltitudine di sostanze, che in uno scenario reale, possono bruciare.

FDS fornisce un notevole quantità di informazioni tramite file di tipo “.csv”, elaborabili da programmi di calcolo (Excel) e tramite file grafici dai quali, tramite l’utility Smokeview, è possibile ottenere rappresentazioni tridimensionali, statiche e dinamiche, dei valori delle principali grandezze.

### **7.3. Considerazioni sull’applicabilità dei software**

Il modello contenuto in CFAST è stato creato e validato per la simulazione di incendi in spazi confinati caratterizzati da dimensioni geometriche proprie degli edifici di civile abitazione, e quindi da locali di modeste dimensioni. Per questi motivi, in tutti gli scenari per i quali le dimensioni dei locali si differenziano, per dislocazione e geometria, da quelli caratteristici dell’edilizia civile, le valutazioni del modello non potranno che essere affette da un certo grado di incertezza. Anche se è oltremodo diffusa l’applicazione del software CFAST per la simulazione di incendi negli scenari più diversi, dai grandi ambienti alle navi, e anche se, per sopperire in parte a tale limitazione, è possibile, in alcuni casi, suddividere il locale reale in più sotto-comparti “virtuali” di dimensioni inferiori, si tratta in ogni caso di un’utilizzazione non del tutto propria del modello. Dalla letteratura [11] si evince come il confronto tra le previsioni di CFAST e i dati provenienti dalle misurazioni sperimentali, riveli che i risultati del modello sovrastimano i valori di temperatura di circa il 25-40% mentre sottostimano i valori di altezza dell’interfaccia dei fumi di circa il 10-40%; gli scostamenti più grossi si verificano però nel caso di incendi in ambienti di grande ampiezza.

D’altro canto, il modello contenuto in FDS è stato originariamente sviluppato per analizzare incendi a scala industriale. Pertanto l’affidabilità dei risultati ottenuti per mezzo del codice di calcolo è ragionevole se la dimensione del focolaio è circoscritta e le dimensioni dell’ambiente sono relativamente grandi rispetto a quelle della sorgente. In tali condizioni, i valori delle velocità dei flussi e delle temperature dei gas sono in ragionevole accordo [4] rispetto a misure sperimentali effettuabili nelle medesime situazioni. Date le origini del modello, gli stessi sviluppatori ammettono che esso deve essere migliorato per quanto riguarda l’affidabilità dei risultati di simulazioni che riproducono lo sviluppo di incendi in ambienti di residenza civile.

Il principale limite del programma, dal punto di vista applicativo, riguarda le risorse hardware necessarie per la sua esecuzione e i tempi di calcolo richiesti.

Sulla base di quanto emerge dalla valutazione delle caratteristiche dei software secondo quanto dichiarato dagli stessi sviluppatori e quanto disponibile nell’ambito della letteratura specialistica, appare evidente come CFAST ed FDS, oltre a simulare il fenomeno dell’incendio in modo molto diverso (più grossolano il primo, più dettagliato il secondo), presentino un diverso grado di applicabilità alle geometrie in esame, caratteristiche degli edifici di interesse storico-artistico. L’applicazione del software CFAST, che è stato creato e validato per la simulazione di incendi in spazi confinati caratterizzati da dimensioni geometriche proprie degli edifici di civile abitazione, risulta al limite, se non già oltre, dell’applicabilità che garantisce la qualità dei risultati. D’altro canto FDS, in qualità di modello di campo e quindi in virtù di una discretizzazione meno grossolana del dominio di calcolo, si adatta più facilmente alle peculiarità della geometria.

## **8. L’APPLICAZIONE A SANTA MARIA DELLA SCALA**

Nell’ambito delle problematiche fin qui discusse si inquadra l’attività di simulazione di incendi

all'interno del Complesso Monumentale di Santa Maria della Scala in Siena che ha un duplice scopo: da un lato essa intende fornire, con un approccio prestazionale, indicazioni utili ai fini della sicurezza antincendio della struttura; dall'altro, in un contesto di ricerca, si propone di focalizzare le problematiche connesse all'applicazione di modelli matematici per la previsione degli effetti di incendi in edifici di interesse storico-artistico.

Il complesso monumentale di Santa Maria della Scala è stato in passato uno dei primi ospedali europei ed ha giovato dell'opera dei migliori artisti senesi diventando il terzo polo artistico della città insieme al Palazzo Pubblico e la Cattedrale. Da punto di vista della sicurezza antincendio esso è caratterizzato principalmente, come spesso accade per gli edifici di questo genere, dalla complessità plano-volumetrica, dalla presenza di cantieri per opere di restauro, dall'esposizione di installazioni temporanee.

All'interno del Complesso, una delle fasi dell'attività ha preso in considerazione la zona del Passeggio, delle Corsie che si affacciano su di esso e della Cappella del Manto, situata al IV livello del complesso. Il Passeggio è un locale di lunghezza pari a circa 36 metri e larghezza pari a quasi 8 metri parallelo al Pellegrinaio, uno dei locali più prestigiosi dell'intero complesso, con il quale comunica tramite una porta monumentale situata nella parte Nord del Passeggio stesso. A Nord del Passeggio è situato il locale della Cappella del Manto, di dimensioni pari a circa 17 metri per 8. Si affacciano sul Passeggio da Ovest 5 corsie che si estendono perpendicolarmente alla sua dimensione maggiore. All'estremità Sud del Passeggio è posta una grande superficie vetrata (vd. Figura 3).

L'insieme del Passeggio, della Cappella del Manto e delle Corsie, costituiscono il dominio di calcolo per le simulazioni condotte con il software FDS e, per confronto, con il software CFAST; gli scenari studiati sono i seguenti:

- incendio all'interno della corsia Spezieria Vecchia con la vetrata del Passeggio chiusa
- incendio all'interno della corsia San Carlo Alberto con la vetrata del Passeggio chiusa
- incendio all'interno della corsia Spezieria Vecchia con la vetrata del Passeggio aperta
- incendio all'interno della corsia San Carlo Alberto con la vetrata del Passeggio aperta

L'insieme degli scenari simulati è stato così articolato al fine di valutare le differenze nell'andamento dei parametri che caratterizzano gli effetti dell'incendio in funzione della localizzazione dello stesso e soprattutto di verificare i benefici apportati dalla possibile apertura della finestra in caso di incendio.

I domini di calcolo relativi agli scenari studiati sono evidenziati in rosso in Figura 1. Nelle simulazioni condotte con CFAST, il Passeggio e la Cappella del Manto sono stati suddivisi in 9 comparti "virtuali", indicati con un numero progressivo da 1 a 9. Questo per il fatto che CFAST mal si adatta a geometrie di tale ampiezza ma anche per tenere conto della presenza degli archi che costituiscono un reale elemento di compartimentazione. Con il software FDS la geometria in oggetto è stata ricostruita con il maggior grado di fedeltà possibile, considerando che il software consente l'utilizzo di soli parallelepipedi; per questo motivo i soffitti sono piatti e non a volta (vd. Figura 3).

In generale, tutte le aperture verso l'esterno del dominio si sono considerate chiuse, ad eccezione delle due indicate con una freccia rossa in Figura 4 e, per gli scenari di incendio che lo prevedono, della vetrata del Passeggio.

### **8.1. Definizione dell'incendio di progetto**

Come precedentemente evidenziato, in tutti gli studi di fire engineering la scelta dell'incendio di progetto rappresenta sempre una fonte di incertezza nei risultati dal momento che risulta sempre difficile prevedere con esattezza la tipologia e la quantità di materiale combustibile presente in un determinato locale al momento dell'innescò. Questa difficoltà vale a maggior ragione per il presente studio, nell'ambito del quale non è disponibile un inventario meticoloso di quanto presente all'interno di ciascun locale della struttura. Si è quindi fatto ricorso alle curve standard solitamente utilizzate negli studi antincendio, le cui peculiarità sono ampiamente documentate in letteratura, utilizzando una curva rappresentativa dell'incendio a crescita media (1 MW a 300 s), adatta per combustibili solidi a bassa densità e quindi per il tipo di materiale che si prevede possa occupare i locali in esame. Nella stazionaria, si è assunto un valore di calore rilasciato pari a 10 MW corrispondente tra l'altro al massimo previsto dal software CFAST per la curva di crescita media. Il valore di 10 MW viene raggiunto dopo 900 secondi e rimane costante per il resto della simulazione.

La curva di incendio scelta può essere rappresentativa dell'incendio che si può originare in una fase di normale attività e può quindi essere riferita al primo degli 8 scenari di incendio previsti dalla Norma NFPA 914 per la valutazione della sicurezza di una struttura con metodi prestazionali.

Il valore massimo di 10 MW può essere considerato conservativo e corrispondente alla potenza emessa dall'incendio peggiore possibile dal momento che, secondo quanto riportato in [10], un incendio che coinvolga una pila di pallets in legno di altezza pari a 3 metri, sviluppa 7 MW.

Per quanto riguarda l'emissione dei prodotti della combustione si sono utilizzati per il fumo, l'anidride

carbonica e il vapor d'acqua, i valori stechiometrici riferiti al legno come riportati nel database di FDS. Per quanto riguarda l'emissione di Monossido di Carbonio si è adottato un valore di "Yield Factor" (rapporto tra la massa di sostanza prodotta e la massa di combustibile bruciato) per il CO pari a 0,14 g/g [10], corrispondente alla combustione del legno in ambienti controllati dalla ventilazione. Tale valore consente di ottenere andamenti delle specie chimiche nel locale in cui si sviluppa l'incendio, congruenti con quanto riportato in letteratura.

Va osservato che l'impostazione dei dati di input per CFAST è più complessa rispetto a FDS. Si evidenzia inoltre che l'utilizzo dei fattori di emissione proposti di default dal software produce valori di concentrazione di CO nel locale in cui si sviluppa l'incendio che sono inferiori di un ordine di grandezza rispetto a quanto rilevato sperimentalmente.

Un problema nell'impostazione dei dati di input riguarda senza dubbio la caratterizzazione delle proprietà termofisiche dei materiali che compongono l'edificio che generalmente non presentano lo stesso comportamento di quelli disponibili sul mercato (circa i quali esistono approfondite conoscenze nei riguardi del comportamento al fuoco). Un aiuto in questo senso può derivare ancora una volta dalla norma NFPA che è provvista di una apposita appendice (Guideline on Fire Ratings of Archaic Materials and Assemblies) che consente di stimare le caratteristiche di resistenza al fuoco di un'ampia varietà di materiali anche se è da valutare la piena applicabilità dei dati proposti a contesti costruttivi diversi da quello statunitense.

Le caratteristiche fisiche dei soffitti e delle pareti che delimitano gli ambienti in esame sono stati considerate equivalenti a quelle dei mattoni di argilla (clay brick), come riportate nel database fornito con il software CFAST.

## 8.2. Soglie di sostenibilità

In questo studio, seguendo un approccio simile a quello indicato in [12] in accordo con [13] si assumono le seguenti soglie di sostenibilità.

- Altezza dello strato di fumo (z) z = 1.5 m se Tg > 65°C
- Temperatura dello strato di fumo (Tg) Tg = 65°C se z < 1.5 m
- Tossicità FED = 0,5.

Il FED è un parametro introdotto dalla norma ISO 13344 del 1996 (Determination of the lethal toxic potency of fire effluents) che rappresenta il primo tentativo di trattazione sistematica del pericolo legato alla tossicità dei prodotti della combustione in caso di incendio. In essa si stabilisce che la tossicità di gas prodotti dalla combustione sia valutata in base al modello FED: Fractional Effective Dose definito dalla seguente relazione:

$$FED = \frac{[CO]}{5000} + \frac{[HCN]}{150} + \frac{[HCl]}{3800} + \frac{[HBR]}{3000} + \frac{[NO]}{1000} + \frac{[NO_2]}{200}$$

in cui i termini nelle parentesi quadre rappresentano le concentrazioni espresse in parti per milione dei vari prodotti di combustione ed i denominatori i rispettivi valori di concentrazione in grado di fornire una probabilità di morte del 50% in un tempo di esposizione di 30 minuti (LC50). Il Dipartimento di Ingegneria Antincendio dell'Università di Lund propone il valore dell'indice FED pari a 0,5 come soglia di sostenibilità dei prodotti della combustione [Frantzich, 1997]. Si osservi che, relativamente al caso in esame in cui l'indagine sui prodotti della combustione è limitata all'esame delle concentrazioni di Monossido di Carbonio, il valore dell'indice FED pari a 0,5, equivale ad una concentrazione di CO pari a 2500 ppm.

Si osserva che, in questa fase dell'attività, l'analisi di vulnerabilità si è limitata agli eventuali occupanti e non si sono fissate soglie di criticità per la salvaguardia delle strutture di grande pregio che costituiscono il complesso.

## 9. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Si riportano nel seguito i risultati ottenuti per alcuni degli scenari simulati come esempio dell'approccio adottato nel valutare le condizioni di sostenibilità negli ambienti. Va precisato che tali risultati sono frutto di assunzioni semplificative discusse al punto 8. (soprattutto per quanto riguarda le caratteristiche di ventilazione e l'andamento della curva di incendio di progetto), che devono ancora essere discusse con i progettisti restauratori del complesso.

Un primo importante risultato delle simulazioni consiste nel fatto che nel caso in cui si consideri aperta la grande finestra del Passeggio, le previsioni con FDS, così come già prima quelle di CFAST, mostrano come non si instaurino condizioni insostenibili all'interno del Passeggio per almeno 1200 secondi (durata della

simulazione con FDS). In questo caso, si osserva ancora che gli effetti dell'incendio al di fuori degli ambienti presi in considerazione ed in particolare nel Pellegrinaio, sarebbero di scarso rilievo.

Nei casi in cui la finestra del passaggio è chiusa si sono invece ricavati i tempi corrispondenti alle soglie critiche o di insostenibilità nelle varie sezioni del Passaggio e nella Cappella del Manto. La Tabella 1 riporta i valori dei tempi in corrispondenza dei quali sono raggiunte le condizioni di insostenibilità nelle varie zone del Passaggio, a causa della presenza di fumo, della temperatura e della concentrazione di Monossido di Carbonio, per i due scenari che prevedono l'incendio rispettivamente nella Corsia Spezieria Vecchia e nella corsia Carlo Alberto. La colonna "condizioni di criticità" contiene le soglie temporali di sostenibilità degli effetti dell'incendio determinate secondi i criteri proposti al punto 8.2 del presente articolo, e cioè combinando il controllo dei tre parametri.

Tabella 1 - Tempi di raggiungimento delle soglie critiche

Zona del passaggio	Incendio Spezieria Vecchia				Incendio San Carlo Alberto			
	H <sub>f</sub> = 1,5 m	T = 65°C	CO = 2500 ppm	Condizione di criticità	H <sub>f</sub> = 1,5 m	T = 65°C	CO = 2500 ppm	Condizione di criticità
1	582	645	685	645	753	947	792	792
2	588	695	706	695	759	905	786	786
3	593	711	710	710	741	896	777	777
4	617	743	713	713	731	869	774	774
5	666	761	719	719	701	835	775	775
6	670	775	721	721	708	784	767	767
7	721	>1200	911	911	812	>1200	1052	1052
8	761	>1200	929	929	830	>1200	1071	1071
9	730	>1200	936	936	783	>1200	1080	1080

Nel caso dell'incendio nella corsia Spezieria Vecchia, i risultati delle simulazioni mostrano come l'instaurarsi di condizioni insostenibili siano legate, nella parte del Passaggio a ridosso del locale in cui si sviluppa l'incendio (zone 1 e 2), alla coppia di parametri altezza dello strato di fumo-temperatura media dello strato di fumo. Proseguendo lungo il passaggio ed allontanandosi dall'incendio, la concentrazione di CO diventa il parametro limitante per stabilire il tempo in corrispondenze dal quale si instaurano le condizioni di invivibilità. In particolare, per quanto riguarda la Cappella del Manto, si può osservare come il valore di temperatura media pari a 65°C non venga raggiunto entro i 1200 secondi che corrispondono alla durata della simulazione.

Nel caso di incendio nella Corsia Carlo Alberto, invece, si evince come il parametro che limita la sostenibilità delle condizioni all'interno del Passaggio e della Cappella del Manto, è la Concentrazione di CO che raggiunge la soglia critica di 2500 ppm in un tempo di poco inferiore agli 800 secondi all'interno del Passaggio e di circa 1100 secondi nella Cappella del Manto.

## 10. CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI DAL MODELLO A ZONE (CFAST) E DAL MODELLO FLUIDODINAMICO (FDS)

Limitatamente ai valori di temperatura e di altezza dello strato di fumo, i risultati ottenuti dal software FDS, e presentati nei paragrafi precedenti, sono stati confrontati con quelli del modello a zone CFAST, applicato agli stessi scenari di incendio. Il confronto ha riguardato in particolare il tempo di raggiungimento delle condizioni critiche all'interno del Passaggio, calcolati dai due software; conseguentemente, non si sono presi in considerazione gli scenari che prevedono l'apertura della grande finestra del Passaggio, per i quali, nelle previsioni di entrambi i software, i limiti di sostenibilità impostati in 8.2 non vengono mai superati.

### 10.1. Confrontabilità dei modelli

Il confronto tra i due software può essere fatto per i risultati frutto di assunzioni comuni nell'ambito dell'impostazione dei parametri di input del calcolo. Per questo motivo è opportuno considerare i seguenti aspetti.

- Il dominio di calcolo preso in considerazione dai due software è lo stesso e comprende il Passaggio, la Cappella del Manto e le Corsie. Nota la difficoltà di CFAST a trattare geometrie ampie, si è optato per una suddivisione fittizia del Passaggio e della Cappella del Manto in 9 comparti virtuali.
- Per quanto riguarda la produzione di fumo si sono mantenuti i dati di input relativi al legno per

entrambi i software, CFAST ed FDS; dal punto di vista dell'andamento della posizione dell'interfaccia di separazione tra strato di fumo e strato (sottostante) imperturbato, quindi i risultati ottenuti con i due strumenti dovrebbero essere confrontabili.

- Dal momento che, per i due software si è impostato lo stesso andamento della curva di rilascio termico HRR e identiche proprietà termofisiche dei materiali costituenti pareti e soffitti, anche i valori di temperatura media dello strato di fumo, possono essere confrontati.
- Le simulazioni effettuate con FDS hanno dimostrato come, in tutti gli scenari, le condizioni di ventilazione di locali in cui si suppone lo sviluppo dell'incendio, sono incompatibili con la curva di rilascio termico impostata, che prevede una crescita con rateo medio fino a 900 secondi ed una fase di rilascio costante a 10 MW. Le curve costruite dal software dimostrano come dopo circa 800-900 secondi, la concentrazione di Ossigeno scenda sotto i livelli che consentono la combustione e conseguentemente la curva di rilascio termico inizia ad assumere un andamento decrescente. D'altro canto, il software CFAST non pare prevedere questa mancanza di comburente, e si mantiene fedele all'andamento della curva HRR impostata. Queste considerazioni conducono ad una conclusione di valenza duplice: da un lato, appare evidente come le differenze nell'approccio alla simulazione dello scenario di incendio siano tali da comportare discrepanze evidenti nei risultati; dall'altro va preso atto del fatto che un confronto dei risultati stessi deve essere limitato al tempo durante il quale i due software seguono la stessa curva di rilascio termico e cioè gli 800-900 secondi iniziali (che rappresentano comunque l'intervallo più interessante ai fini dell'evacuazione).

E opportuno infine ricordare che, sebbene nessuno dei due software possa essere preso come riferimento assoluto, dal momento che entrambi attuano una modellizzazione della realtà inevitabilmente soggetta ad errore, FDS è uno strumento indubbiamente e nettamente più raffinato rispetto a CFAST. E quindi molto probabile, come indicato dalla letteratura disponibile in materia, che FDS consenta di ottenere simulazioni degli scenari di incendio più vicine alla realtà.

## 10.2. Valori dell'altezza dell'interfaccia dello strato di fumo

Si riportano in Figura 1 i valori del tempo di raggiungimento delle condizioni di insostenibilità a causa della quantità di fumo presente nelle varie sezioni del Passeggio e della Cappella del Manto, come calcolati da CFAST e FDS. La mancanza del dato di CFAST per il punto 6 è dovuta al fatto che, secondo la previsione del software, l'interfaccia dello strato di fumo, non raggiunge la soglia critica di 1,5 metri per tutta la durata della simulazione (3600 secondi).

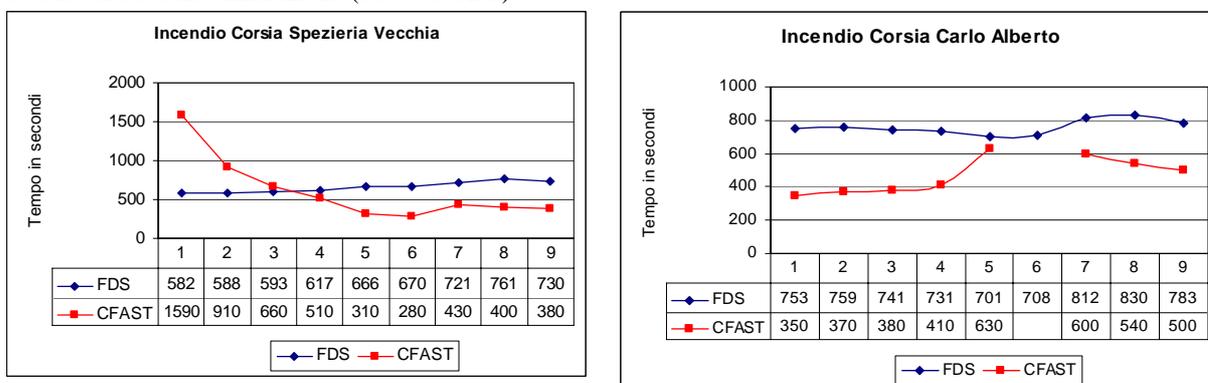


Figura 1 - Tempi di raggiungimento delle condizioni critiche per l'altezza dell'interfaccia dello strato di fumo

I grafici evidenziano una notevole discrepanza nei risultati ottenuti dai due software. Si sottolinea in particolare la differenza di andamento delle curve che uniscono i punti rappresentativi dei tempi critici nelle diverse sezioni del Passeggio. I risultati di FDS suggeriscono che lo strato di fumo scenda in modo omogeneo all'interno del Passeggio e della Cappella del Manto registrando differenze ridotte tra il tempo di raggiungimento delle condizioni critiche di insostenibilità nella zona più prossima e in quella più remota, rispetto al locale in cui si sviluppa l'incendio. Nel caso di CFAST, invece, i tempi sono molto diversi nelle varie zone e, soprattutto, sono elevati in prossimità della corsia in cui si sviluppa l'incendio diminuendo nell'allontanarsi. Questo significa che il software prevede condizioni più gravose nelle zone del Passeggio più lontane dall'incendio.

## 10.3. Valori di temperatura

In modo equivalente a quanto fatto nel paragrafo precedente, si discutono nel seguito i risultati relativi alla temperatura media nello strato di fumo ottenuti dai due software e riportati in Figura 2.

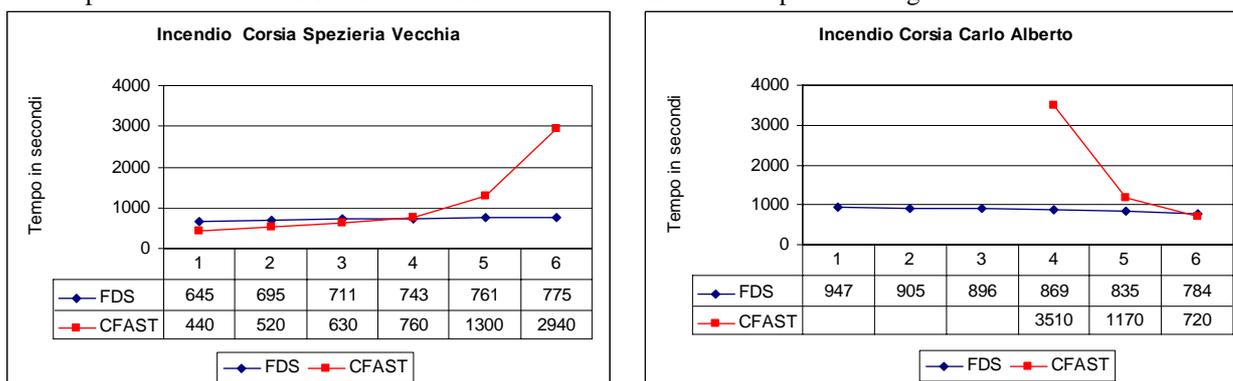


Figura 2 – Tempi di raggiungimento delle condizioni critiche per la temperatura media dello strato di fumo

In questo caso, i software sono concordi nel prevedere condizioni di temperatura via via meno gravose allontanandosi dalla Corsia in cui avviene l'incendio, secondo l'andamento più plausibile. Accanto a questo dato, si ribadisce comunque una notevolissima differenza nei risultati ottenuti, soprattutto per il caso che prevede l'incendio nella Corsia San Carlo Alberto, per il quale il valore critico di 65°C della temperatura media dello strato di fumo non viene mai raggiunto nella sezioni 1,2 e 3.

#### 10.4. Considerazioni conclusive sul confronto dei risultati

I risultati ottenuti da FDS e CFAST evidenziano differenze notevoli e tali da renderne difficoltoso il confronto. Considerate le caratteristiche e i limiti di ciascun software e valutata la verosimiglianza delle rispettive previsioni, non pare azzardato concludere che il software CFAST, per il modo in cui è stato utilizzato, si è dimostrato scarsamente compatibile con gli scenari e le geometrie analizzate. Questa conclusione non giunge inattesa alla luce del fatto che CFAST è stato sviluppato per geometrie tipiche dell'edilizia civile e non si adatta al meglio ad ambienti caratterizzati da grandi volumetrie. Anche se è oltremodo diffusa l'applicazione del software CFAST per la simulazione di incendi negli scenari più diversi, dai grandi ambienti alle navi, e anche se, per sopperire in parte a tale limitazione, è possibile, in alcuni casi, suddividere il locale reale in più sotto-comparti "virtuali" di dimensioni inferiori, si tratta in ogni caso di un'utilizzazione non del tutto propria del modello. Anche in questo caso, si è optato per una suddivisione fittizia del Passeggio e della Cappella del Manto, creando 9 comparti corrispondenti alle volte che costituiscono i due locali. Visti i risultati ottenuti, che non sembrano verosimili; si segnala come spunto di approfondimento futuro, la possibilità di verificare eventuali benefici apportati da una diversa suddivisione dei locali.

## 11. CONCLUSIONI

A seguito della crescente richiesta di efficienza dei sistemi produttivi e di allocazione delle risorse destinate alla sicurezza, in quasi tutte le nazioni industrializzate è stato avviato da alcuni anni il tentativo di affiancare, al tradizionale sistema della normazione di tipo prescrittivo, un sistema di valutazione della sicurezza di tipo prestazionale cioè in grado di dimostrare il raggiungimento dell'obiettivo di sicurezza sulla base del comportamento del sistema in caso di incendio. Questa necessità, è sentita più frequentemente nei riguardi degli edifici caratterizzati da forte singolarità, come quelli di interesse storico artistico, o dei grandi progetti, in cui è più probabile che si manifesti l'impossibilità di ottemperare completamente alle norme prescrittive. Malgrado questo orientamento generale, sussistono ancora delle difficoltà evidenti nell'applicazione diffusa dei metodi prestazionali, dovuti principalmente alle carenze nella normativa specifica (soprattutto in Italia e in Europa) e alla necessità di approfondire la definizione della metodologia che porta al riconoscimento della congruità del progetto antincendio. Ferma restando la necessità di ottemperare scrupolosamente a tutti i passi della procedura prestazionale, è innegabile come un punto cruciale della stessa sia la scelta e la modellazione degli scenari di incendio al fine di verificare la capacità di soddisfare i requisiti di sicurezza fissati, da parte del progetto proposto.

A questo proposito è in atto un'attività che vede la collaborazione degli autori e riguarda la simulazione di scenari di incendio all'interno del Complesso di Santa Maria della Scala in Siena. La prima fase dell'attività ha riguardato la simulazione di diversi scenari di incendio con un duplice scopo: da un lato essa

intende fornire, con un approccio prestazionale, indicazioni utili ai fini della sicurezza antincendio della struttura; dall'altro, in un contesto di ricerca, si propone di focalizzare le problematiche connesse all'applicazione di modelli matematici per la previsione degli effetti di incendi in edifici di interesse storico-artistico. La fase dell'attività documentata nel presente articolo ha focalizzato il problema della scelta del modello matematico attraverso il confronto dei risultati ottenuti da un modello a zone (CFAST) e un modello di campo (FDS).

In virtù delle sue caratteristiche, FDS si è rivelato uno strumento adatto per simulare gli scenari di incendio ipotizzati. La fase di inserimento dei dati di input è sufficiente chiara da consentire una trattazione accurata del caso in esame, anche se alcuni dati non sono di facile determinazione dal momento che richiedono una conoscenza dettagliata della quantità e tipo del materiale combustibile presente e delle caratteristiche fisiche dei materiali di rivestimento. FDS offre una previsione molto accurata degli effetti dell'incendio, fornendo una grande quantità di informazioni. A fronte di questi vantaggi, l'utilizzo del software è senza dubbio laborioso, sia nella fase di input, in cui occorre fornire tutte le informazioni attraverso un file di testo, sia nella fase di calcolo che richiede tempi piuttosto lunghi (40-50 ore per ognuno degli scenari qui presentati), sia nella fase di acquisizione e trattamento dei dati di output.

I risultati ottenuti da FDS e CFAST evidenziano differenze notevoli e tali da renderne difficoltoso il confronto. Considerate le caratteristiche e i limiti di ciascun software e valutata la verosimiglianza delle rispettive previsioni, non pare azzardato concludere che il software CFAST, per il modo in cui è stato utilizzato, si è dimostrato scarsamente compatibile con gli scenari e le geometrie analizzate. D'altro canto è indubbio che il grado di incertezza che caratterizza i dati di input dell'analisi, rischia di vanificare l'ingente investimento profuso in una modellazione dettagliata con FDS. Va inoltre aggiunto che il trattamento del problema della sicurezza antincendio in una grande struttura comporta la simulazione di un grande numero di scenari su domini molto estesi che richiederebbero enormi tempi di calcolo. E' quindi da escludere, nel caso di una analisi estesa a tutto il complesso del Santa Maria o ad altre strutture simili, l'esclusivo utilizzo del solo CFAST o del solo FDS. Un possibile futuro sviluppo concerne l'applicazione di metodi semiprobabilistici basati sull'estrapolazione di correlazioni estratte dai risultati di un numero ridotto di simulazioni con i modelli deterministici.

## 12. BIBLIOGRAFIA

- [1] K. B. McGrattan, G. P. Forney, J. E. Floyd, S. Hostikka, K. Prasad, *Fire Dynamics Simulator (Version 3) – User's Guide*, NISTIR 6784, 2002 Ed., National Institute of Standards and Technology Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland, November 2002
- [2] S.Marsella, L.Nassi, L.Barneschi, *L'applicazione della fire engineering e del code NFPA 914 nell'analisi antincendio del complesso monumentale del S.Maria della Scala in Siena*, Convegno Nazionale VGR 2002, Pisa, 15-17 ottobre 2002
- [3] P. A. Reneke,; M. J. Peatross, W. W. Jones, C. L. Beyler,; R. Richards, *Comparison of CFAST Predictions to USCG Real-Scale Fire Tests*.NISTIR 6446, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 11, No. 1, 43-68, February 2001
- [4] A. Musser, K. McGrattan, J. Palmer, *Evaluation of a Fast, Simplified Computational Fluid Dynamics Model for solving Room Airflow Problems*, NISTIR 6760, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (MD), June 2001
- [5] NFPA 914, *Code for Fire Protection of Historic Structures*, National Fire Protection Agency, 2001 Edition
- [6] R.D. Peacock, P.A. Reneke, W.W. Jones, R.W. Bukowski, G.P. Forney, *A User's Guide for FAST: Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport*, Special Publication 921 2000 Edition, National Institute of Standards and Technology Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland, January 2000
- [7] SFPE, *Performance-Based Fire Protection, Analysis and Design of Buildings*, Society of Fire Protection Engineers, Quincy, MA, 2000
- [8] J. Lundin, *Model Uncertainty in Fire Safety Engineering*, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, Report 1020, Lund 1999
- [9] S. Marsella, G. Vigne, *L'approccio ingegneristico alla protezione dagli incendi*, Antincendio, 11/99
- [10] B. Karlsson, J.G. Quintiere, *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press, 1999
- [11] J. Lundin, *Uncertainty in smoke transport models*, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, Report 3086, Lund 1997
- [12] H. Frantzich, *Fire Safety Risk Analysis of a Hotel*, Report 3091, Department of Fire Safety

Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University

[13] D.A. Purser, *Toxicity Assessment of Combustion Products*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, SFPE, Boston, 1988

[14] M. Ferrero, *Prevenzione e protezione antincendio negli edifici di interesse storico artistico*.

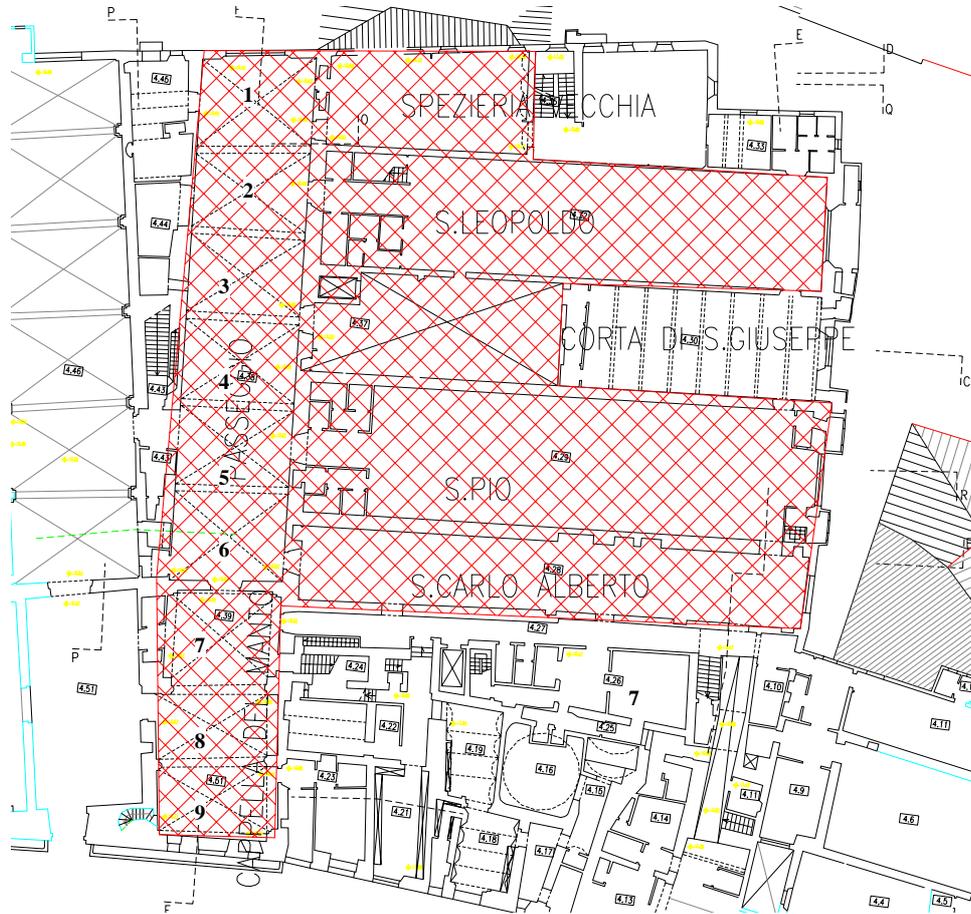


Figura 3 – Dominio di calcolo (scala 1:500)

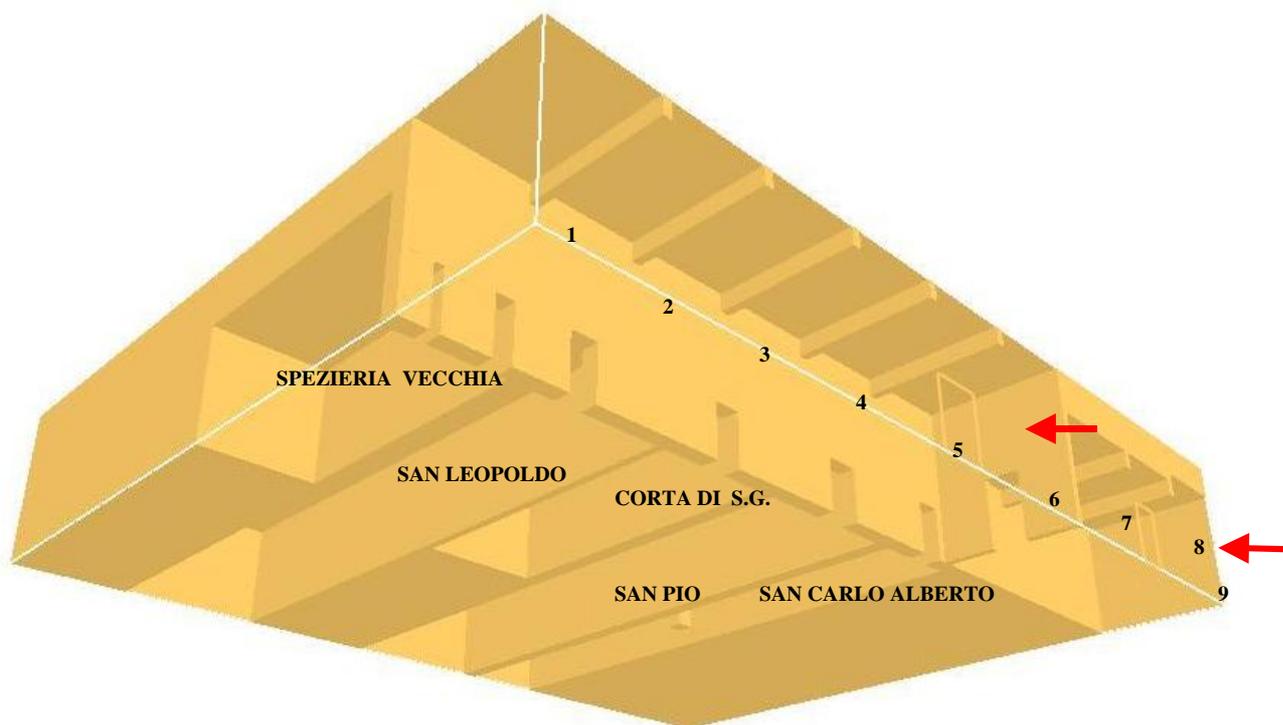


Figura 4 – Ricostruzione della geometria con il software FDS