

# **L'APPLICAZIONE ALLA "FIRE SAFETY ENGINEERING" DI STRUMENTI DELL'ANALISI DI RISCHIO PER AUMENTARE L'EFFICIENZA DELLO STUDIO E L'OTTIMIZZAZIONE DEL LIVELLO DEGLI INTERVENTI SUL PROGETTO ANTINCENDIO**

**F. Dattilo (1), L. Fiorentini (2), V. Puccia (3), V. Rossini (2), S. Scarpellini (4) S. Tafaro (5)**

**1 Comando Provinciale Vigili del Fuoco Venezia, Via Dorso Duro, 3862, Venezia, 30123, Italia**

**2 TECSA S.p.A., Via Figino, 101, Pero, 20016, Italia**

**3 Direzione Interregionale Vigili del Fuoco Padova, Via Dante, 55, Padova, 35137, Italia**

**4 Studio Associato AReS, Via Mons. Maggiolini, 3, Rho, 20017 Italia**

**5 Comando Provinciale Vigili del Fuoco Siracusa, Via Augusto Von Platen, 33, Siracusa, 96100, Italia**

## **SOMMARIO**

L'entrata in vigore del D.M. 9 maggio 2007 "Direttive per l'attuazione dell'Approccio Ingegneristico alla Sicurezza Antincendio" sancisce, anche da un punto di vista normativo, la possibilità del ricorso alle metodologie dell'ingegneria antincendio prestazionale ("Fire Safety Engineering", FSE) come strumento di analisi per la progettazione, nell'ambito della sicurezza antincendio con particolare riferimento e complessi produttivi e costruzioni civili di particolare pregio architettonico, destinati normalmente alla fruizione da parte del pubblico e a layout complesso. Questo è tanto più vero per edifici già esistenti, spesso soggetti a vincolo architettonico. Una delle sfide di questo nuovo approccio è comprendere quanto a fondo incidere con misure protettive sia impiantistiche che gestionali per la riduzione del rischio, potendosi virtualmente porre dei sempre nuovi scenari o degli ulteriori interventi, ovvero delle prescrizioni gestionali più restrittive, volte alla riduzione del rischio ed allo speculare aumento della sicurezza antincendio. Questo articolo vuole fornire un contributo alla diffusione degli strumenti della FSE mostrando l'utilità dell'applicazione degli strumenti classici dell'analisi di rischio ai fini della identificazione degli scenari di incendio e per la scelta delle soluzioni per la mitigazione del rischio ed un livello ragionevolmente accettabile Approccio che, in linea con lo spirito del decreto, consente ai progettisti ed ai valutatori di disporre di un valido strumento di supporto alle decisioni nell'ambito del processo progettuale e di verifica delle prestazioni antincendio di un manufatto edilizio.

## **1.0 METODOLOGIA**

L'introduzione anche nel quadro normativo italiano di una regolamentazione prestazionale alla sicurezza antincendio ha raggiunto il primo anno, considerando l'emanazione del D.M. 9/5/2007. Tale prima scadenza permette di effettuare alcune valutazioni circa le criticità ed i punti di forza dell'approccio ingegneristico alla prevenzione incendi; così pure si vuole fornire una metodologia quanto più possibile generale per l'individuazione degli scenari di incendio che costituiscono il nucleo centrale dello studio prestazionale successivo, basato su modelli quantitativi sia per l'esodo che per la propagazione degli effetti dell'incendio. Tale schema è stato testato su di un "case study" reale con diversi elementi di criticità, particolarmente per l'esodo degli occupanti.

L'analisi di diverse istanze di prevenzione incendio con l'approccio ingegneristico da parte degli autori appartenenti al Corpo Nazionale VV.F. ha evidenziato infatti che gran parte dello sforzo progettuale venga riposto nella simulazione con pacchetti di Fluidodinamica Computazionale (CFD) degli effetti dell'incendio, e nella rappresentazione grafica degli stessi, che in un accurato studio sui possibili scenari, sia riguardo gli occupanti che, eventualmente le strutture.

Va inoltre considerato che, a differenza dei campi di ormai normale utilizzo degli strumenti della CFD, come gli studi fluidodinamici su sistemi svariati, dal Mixing all'aerodinamica per veicoli, nel caso di un incendio non è possibile, a priori, conoscere la localizzazione dell'eventuale innesco, né la sequenza che porti allo sviluppo dell'incendio vero e proprio, né tanto meno la geometria "esatta" dell'edificio, in quanto lo stato aperto/chiuso di varie aperture può modificare radicalmente il risultato della simulazione stessa.

Si consideri infatti che l'uso abituale in fase di progetto di pacchetti CFD parte "a priori" con l'esatta conoscenza del sistema e della sua geometria per indagarne, in supporto a prove sperimentali, il comportamento in condizioni ben determinate, usando anche risultati sperimentali come parametro di riferimento.

Di contro l'utilizzo per scenari di incendio di tali sistemi parte a monte con condizione di indeterminazione sia sul luogo di origine che sulle modalità di propagazione dell'incendio, considerando anche che il quantitativo di materiale combustibile presente ha, di per sé, una connotazione statistica, specialmente su attività di tipo produttivo. E che la geometria può essere modificata dalla normale attività presente all'interno. A tali incertezze vanno aggiunti i classici aspetti di scelta della mesh grid per la risoluzione numerica delle equazioni di Reynolds Navier Stokes ottimizzate per il fenomeno incendio, la trattazione della Turbolenza con i vari metodi noti (DNS, LES) etc. La vera problematica attuale quindi risiede nella potenza stessa dei codici di calcolo e di simulazione che oggi giorno sono a disposizione della FireSafety Engineering. I modelli teorici, ed in modo speciale i codici di simulazione, hanno una particolare capacità di assistere il progettista nelle decisioni connesse con la sicurezza antincendio. Comunque questi strumenti hanno anche un potenziale di danno e possono guidare verso decisioni non accettabili. In considerazione di ciò è necessario un approccio metodologico ben codificato e strutturato, oltre che valutabile in modo obiettivo anche da soggetti terzi (es. Autorità). Tale problematica è, a tutti gli effetti, la stessa di 11 anni fa. Negli ultimi 20 anni si è osservato un incremento importante nel numero dei codici automatici a disposizione per l'analisi e la simulazione del rischio di incendio. Sono stati prodotti sia modelli di tipo probabilistico, che modelli di tipo deterministico. Molti modelli esistenti sono in fase di miglioramento e nuovi modelli continuano ad essere rilasciati per l'uso in questo campo. Comunque come tali modelli debbano essere applicati in modo efficace come tassello di un processo di progettazione è ancora molto lontano dall'essere conosciuto e diverse aree di problematiche si sono evidenziate. E' necessario individuare un contesto in cui tali modelli vengono impiegati e riconosciuti da tutti gli attori. La domanda più importante alla quale è necessario rispondere è: quali e quanti modelli in realtà possono integrarsi con la conoscenza e l'esperienza esistenti e possono costituire parte di un approccio integrato coerente alla progettazione ed al rispetto delle norme e dei regolamenti esistenti (codici prescrittivi n.d.r.)?

- (a) Quali sono i limiti e le capacità di un modello di calcolo (ivi incluso il software che lo implementa e lo rende disponibile), perché esso possa essere impiegato con consapevolezza?
- (b) Quali sono le condizioni, i limiti di batteria, etc. sulla base dei quali uno o più modelli possono essere impiegati nell'analisi di un caso reale in modo accettabile?

Un tema centrale che emerge è la necessità di evitare il pericolo di vedere un modello di calcolo come a sé stante, come vincolo principale di una analisi, come metodologia stessa adatta alla analisi di qualsivoglia problema antincendio nell'ambito di qualsivoglia dominio di simulazione, come una storta di deus ex machina. Il/i codici di calcolo automatici non costituiscono la metodologia e non rappresentano l'ingegneria antincendio prestazionale. Essi, a tutti gli effetti sono uno strumento a supporto del processo di progettazione o di verifica antincendio, del quale devono conoscersi vantaggi, svantaggi prima dell'uso. In casi particolari di analisi lo strumento di calcolo automatico maggiormente adatto viene selezionato a partire dai dati ottenuti dalla simulazione stessa nell'ambito di un processo iterativo di analisi a grado di approfondimento crescente. Con tutte queste considerazioni, comunque, si considera che la simulazione fluidodinamica dell'incendio rappresenti uno strumento di grande valore all'interno di tutto il processo dell'approccio ingegneristico alla prevenzione incendi, ad esempio nella scelta tra (poche) soluzioni progettuali alternative, anche per la determinazione della soglia definita ALARP, compatibilmente con gli obiettivi di sicurezza antincendio fissati per la struttura. Questa memoria vuole apportare un contributo alla diffusione dell'approccio ingegneristico alla prevenzione incendi focalizzando principalmente la scelta degli scenari di incendio e proponendo uno schema di applicazione generale per la generazione degli scenari e lo screening di questi ultimi in base a valutazioni quantitative di criticità, in modo da esaminare con strumenti CFD un ristretto numero di scenari critici, o poche soluzioni alternative per uno scenario critico, che siano emersi dall'esame di un numero elevato di possibili casi generati partendo dallo standard NFPA 101, Life Safety Code<sup>®</sup>, ed. 2006. Questo approccio, ancorché parzialmente in contrasto con le metodologie "classiche" (norme, regole tecniche, standard, etc.), comunque non invalida i codici prescrittivi. Essi rappresentano la miglior scelta nella maggior parte dei casi. Solo in alcune situazioni specifiche le metodologie orientate alla garanzia della prestazione antincendio consentono in approfondimento dell'analisi del rischio di incendio ed una previsione utile ad evidenziare il grado di sicurezza dell'edificio anche in relazione a possibili alternative di protezione, costituendo un valido strumento di supporto al progettista.

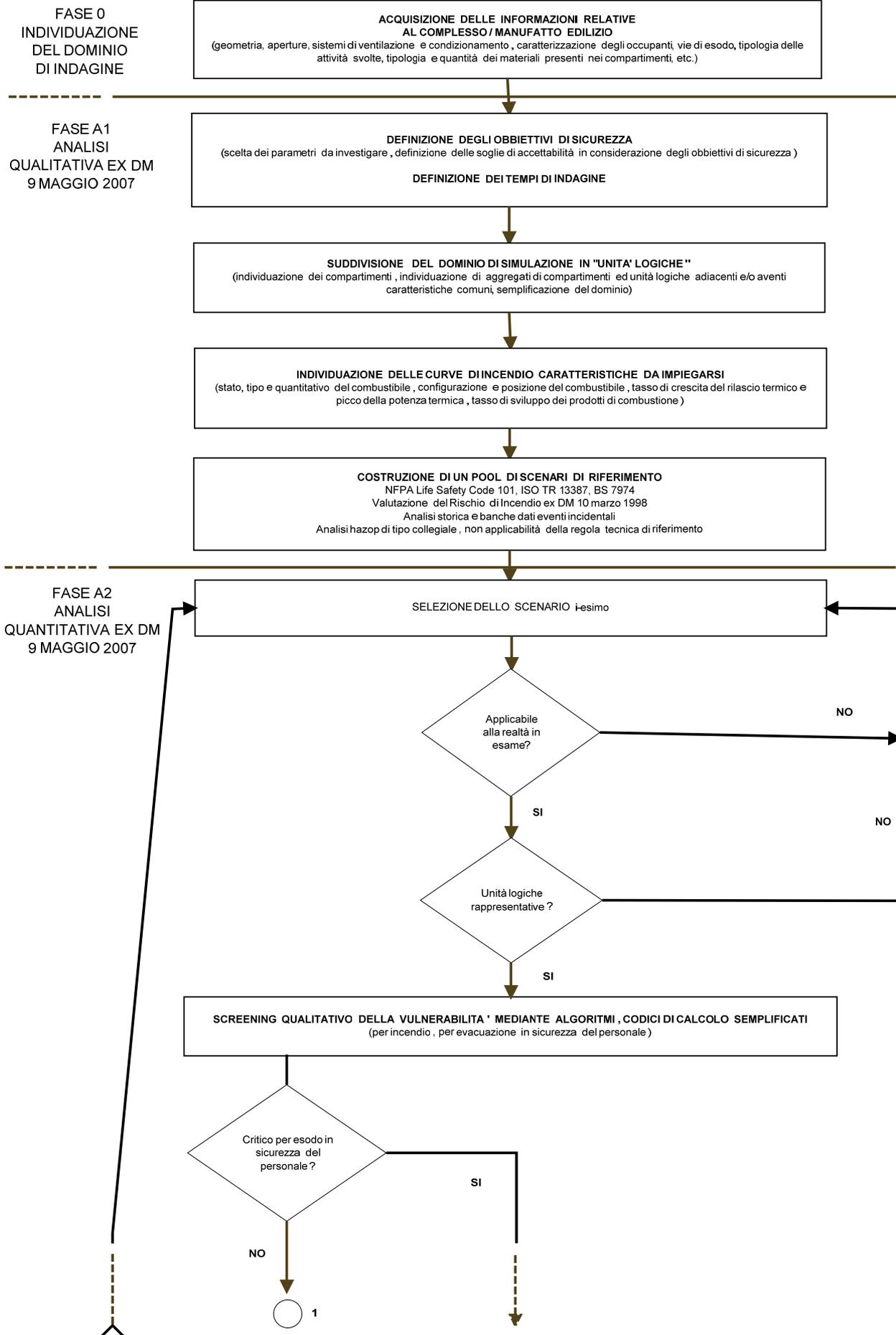
Lo schema proposto per l'identificazione degli scenari parte dagli otto scenari generici proposti dall'NFPA 101; tali scenari sono ripresi anche nella norma NFPA 5000 "Building construction and safety code". In tale guida essi sono citati quali punto di partenza dell'analisi, da integrarsi sulla base di considerazioni specifiche sulla realtà oggetto di indagine. Nella tabella seguente sono riassunti gli altri scenari a titolo esemplificativo.

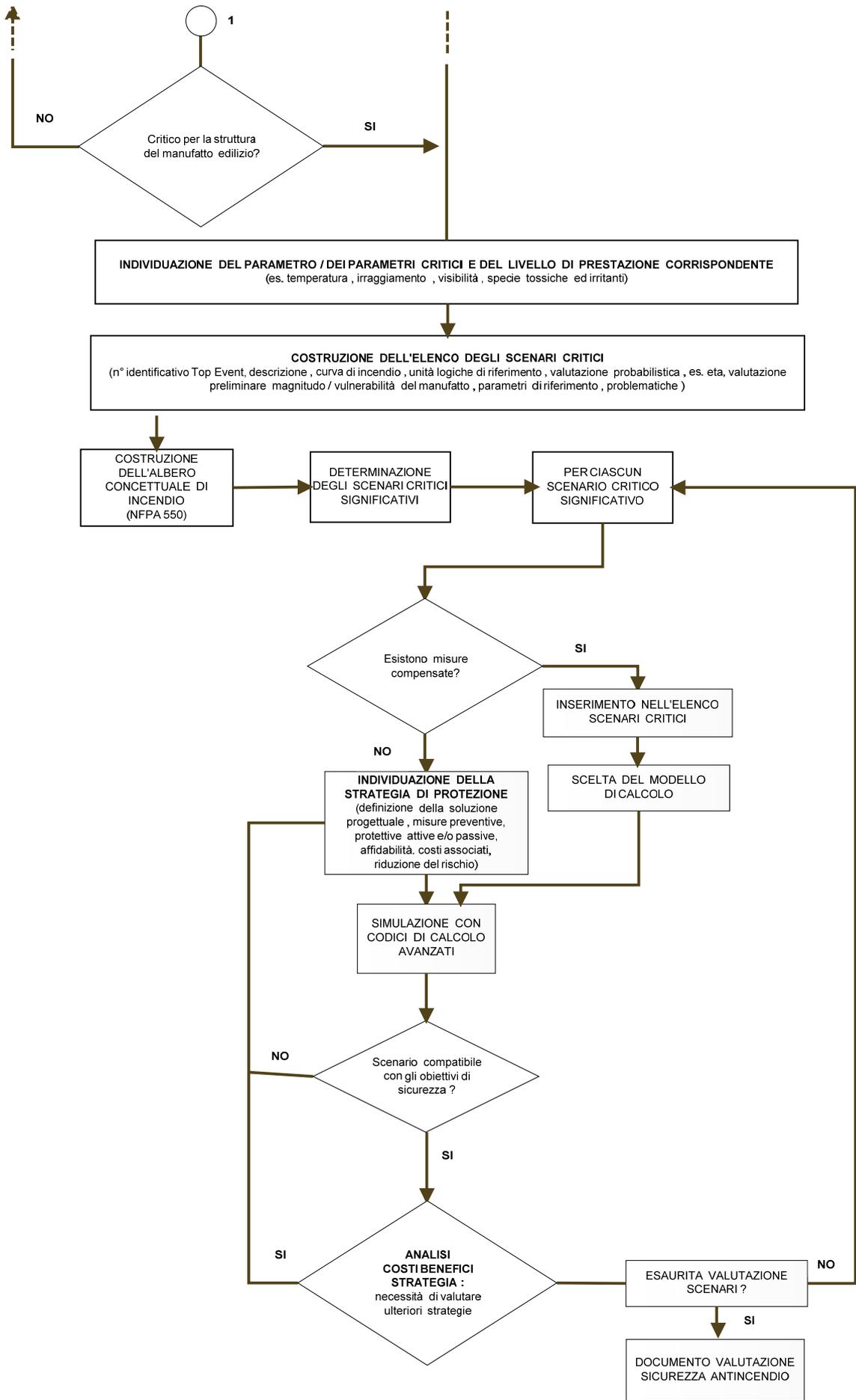
Tabella 1. Scenari

<b>Scenario d'incendio N°</b>	<b>Descrizione</b>
<b>1</b>	Scenario tipico che considera le attività, il numero e la localizzazione degli occupanti, le dimensioni degli ambienti, la natura e l'entità degli arredi e degli elementi presenti, le proprietà degli elementi combustibili, delle possibili sorgenti di ignizione e le condizioni di ventilazione con specifica definizione del primo elemento che prende fuoco e della sua localizzazione
<b>2</b>	Scenario che considera un fuoco a sviluppo ultraveloce, ubicato nelle vie di uscita con le porte interne aperte all'inizio dell'incendio
<b>3</b>	Scenario con incendio che ha inizio in un ambiente normalmente non occupato e che potenzialmente può mettere in pericolo la sicurezza di un grande numero di persone in un ampio ambiente limitrofo o in un'altra area dell'edificio
<b>4</b>	Scenario con un incendio che ha origine a parete o a soffitto in posizione adiacente un ambiente ad alta presenza di persone
<b>5</b>	Scenario con un incendio che si sviluppa lentamente in posizione non coperta dai sistemi di protezione antincendio e in prossimità di una zona con rilevante presenza di persone
<b>6</b>	Scenario dell'incendio più grave, derivante dal più elevato carico d'incendio previsto nell'edificio, a sviluppo rapido e con presenza di persone
<b>7</b>	Incendio che si sviluppa al di fuori della zona di interesse e che risulta suscettibile di estendersi a quest'ultima, o bloccarne le uscite, o determinare condizioni interne non sostenibili
<b>8</b>	Scenario d'interesse e considerando il malfunzionamento e/o l'assenza delle protezioni attive o passive antincendio previste in progetto, disattivate singolarmente e in sequenza

Tale scelta è stata operata alla luce della generalità degli scenari proposti dalla norma, nata peraltro per un approccio non per forza ingegneristico, ma che tenga conto delle problematiche di sicurezza antincendio con particolare attenzione agli occupanti della struttura ed alle loro caratteristiche (età, capacità di deambulazione autonoma, conoscenza dell'edificio etc.). A questo scopo si è scelto di applicare una tecnica comune nell'analisi di rischio, analizzando separatamente ciascun compartimento, e per compartimenti più grandi come open spaces, ciascuna zona omogenea di ogni compartimento. Suddividendo così ogni layout di piano dell'edificio in una serie di zone, comprensive anche delle vie di esodo e delle aree normalmente non occupate stabilmente da personale. A questo punto si applicano sistematicamente, come "scenari guida" ad ogni zona quelli proposti dalla NFPA 101®, generando una serie di scenari, dei quali solo una parte sarà significativa. La valutazione di non significatività verrà data in base all'esperienza del redattore dello studio, qualora lo scenario i-esimo applicato alla zona in oggetto non sia fisicamente applicabile.

A questa lista di scenari andranno aggiunti quelli che derivassero dall'esperienza storica su strutture analoghe per tipologia geometrica, destinazione di uso, caratteristiche degli occupanti o particolari lavorazioni svolte. Questo elenco verrà indagato dapprima con strumenti semplificati, quali ad esempio dei modelli a zona, e verificando che parametri quali l'emissione di energia e fumi nocivi e la velocità di propagazione non configghino con gli obiettivi di progetto, ad esempio con i tempi di esodo degli occupanti, ovvero con i livelli di prestazione richiesti, potendo anche calcolare con strumenti semplificati i tempi dell'esodo. Per la valutazione con modelli semplificati si può fare riferimento anche alla norma ISO TR 13387-2 per i tempi di sviluppo e le curve di incendio. Va inoltre considerato che è opportuno considerare se la presenza di aperture nel compartimento o eventuali alterazioni alla geometria originale indotte dall'incendio possano generare scenari secondari, valutando anche per questi ultimi la criticità. Qualora si rilevi che i risultati del primo esame con modelli semplificati non generi particolari criticità, in quanto i dati sul rilascio energetico e sulla quantità di sostanze emesse ottenuti siano, entro margini di sicurezza, all'interno dei valori fissati con gli obiettivi di sicurezza antincendio tale scenario potrà ritenersi verificato, passando al successivo.





1

NO

SI

Critico per la struttura del manufatto edilizio?

**INDIVIDUAZIONE DEL PARAMETRO / DEI PARAMETRI CRITICI E DEL LIVELLO DI PRESTAZIONE CORRISPONDENTE**  
(es. temperatura , irraggiamento , visibilità , specie tossiche ed irritanti)

**COSTRUZIONE DELL'ELENCO DEGLI SCENARI CRITICI**  
(n° identificativo Top Event, descrizione , curva di incendio , unità logiche di riferimento , valutazione probabilistica , es. eta, valutazione preliminare magnitudo / vulnerabilità del manufatto , parametri di riferimento , problematiche )

COSTRUZIONE DELL'ALBERO CONCETTUALE DI INCENDIO (NFPA 550)

DETERMINAZIONE DEGLI SCENARI CRITICI SIGNIFICATIVI

PER CIASCUN SCENARIO CRITICO SIGNIFICATIVO

Esistono misure compensate?

SI

NO

**INDIVIDUAZIONE DELLA STRATEGIA DI PROTEZIONE**  
(definizione della soluzione progettuale , misure preventive, protettive attive e/o passive, affidabilità, costi associati, riduzione del rischio)

INSERIMENTO NELL'ELENCO SCENARI CRITICI

SCELTA DEL MODELLO DI CALCOLO

SIMULAZIONE CON CODICI DI CALCOLO AVANZATI

Scenario compatibile con gli obiettivi di sicurezza ?

NO

SI

**ANALISI COSTI BENEFICI STRATEGIA :**  
necessità di valutare ulteriori strategie

SI

ESAURITA VALUTAZIONE SCENARI ?

NO

SI

DOCUMENTO VALUTAZIONE SICUREZZA ANTINCENDIO

Qualora, invece, sorgano dei dubbi sull'interazione dei dati di modelli semplificati con i parametri di sicurezza fissati, o vi siano delle criticità derivanti dalla geometria originale o da sue configurazioni, o dal mancato avvio di alcuni dei sistemi antincendio ovvero la zona in esame appaia in contrasto con i limiti di approssimazione del modello semplificato, tale scenario andrà considerato come critico ed analizzato con un modello CFD focalizzando gli aspetti di criticità sia come sviluppo di fumi nocivi e fuliggine che come rilascio energetico e sollecitazione termica sulle strutture o sulle superfici limitanti il compartimento. Qualora dovessero originarsi modificazioni sostanziali alla geometria originale durante l'incremento di temperatura (es. rottura di superficie vetrata interna o esterna) l'ulteriore scenario andrà preso in considerazione.

Una situazione simile potrebbe derivare dal mancato intervento di una parte dei sistemi automatici di rilevazione, di spegnimento (Design Fire Scenario 8, [19]) o di chiusura automatica dei serramenti resistenti al fuoco. Per la valutazione scenari secondari, veri e propri effetti domino, potranno anche essere considerati, se ritenuto necessario, strumenti quantitativi come l'albero degli eventi (cfr. [16])

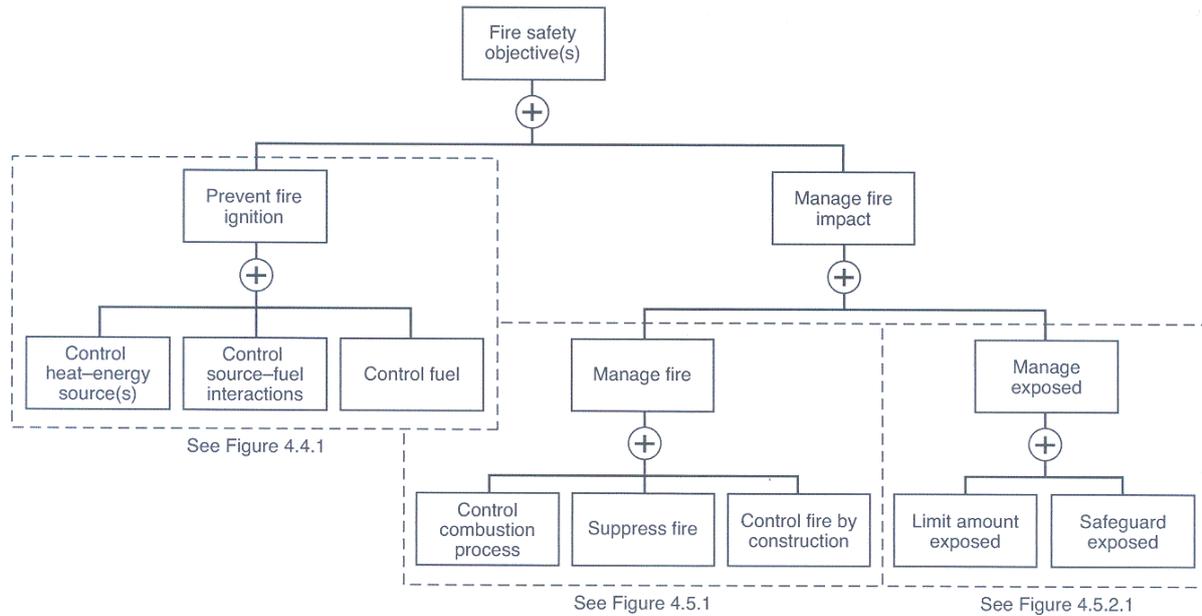
Alla fine di questo processo iterativo emergerà un gruppo, si spera limitato, di scenari critici, ove andrà condotta precauzionalmente un'analisi di sensitività sui parametri adottati per definire l'incendio nel modello e per superfici molto estese uno studio sull'influenza dell'ubicazione del focolaio iniziale sugli effetti e lo sviluppo dell'incendio. Chiaramente in ciascuno scenario si focalizzerà l'elemento produttore di rischio più rilevante (fumi o campo di temperatura) ai fini della sicurezza, sia per gli occupanti che per le strutture. Sugli scenari critici risultanti dal precedente studio sistematico sarà possibile verificare l'effetto di misure compensative e/o mitigative come l'installazione mirata di sistemi di evacuazione dei fumi, impianti automatici di spegnimento etc. onde valutarne l'efficacia in termini di costo/beneficio, valutando in base a parametri oggettivi quale sia il più basso rischio accettabile.

Nel contempo l'intero complesso sarà stato sottoposto ad uno screening sistematico per ogni zona omogenea in modo da rendere meno probabile che una criticità sfugga completamente all'analisi di rischio.

Nello stesso tempo si saranno valutati gli eventuali effetti domino derivanti da scenari di per sé non critici ma che sotto particolari condizioni possono condurre a successive condizioni di rischio.

L'utilizzo di modelli semplificati per lo screening è un passo obbligato sia dalla complessità computazionale derivante dall'utilizzo di modelli CFD, sia dalla grande mole di dati richiesti da questo tipo di applicativi per fornire dei risultati che siano accurati entro i limiti della fire safety engineering.

Il riscontro tra le risultanze dei modelli semplificati di esodo e di incendio fornisce, comunque, un termine di riferimento per l' "engineering judgement" dell'analista, che rimane ovviamente centrale. In ogni caso il metodo proposto in questa sede vuole proporsi come uno strumento sistematico per un'analisi preventiva più attenta alla tipologia degli scenari che abbia carattere di generalità per la valutazione del rischio relativa alla sicurezza antincendio ed allo studio della conseguenza derivanti da incendio accidentale, applicando ad ogni compartimento almeno un'analisi seppur con modelli semplificati. Per ciascuno degli scenari individuati come critici (per una o più problematiche, quindi per uno o più livelli di sicurezza) il progettista sarà in grado di schematizzare le peculiarità dello scenario di riferimento adottando una visualizzazione basata sul "Fire safety concept tree", così come previsto dalla NORMA NFPA 550 ("Guide to the fire safety concept tree"). L'analisi degli alberi di ciascuno scenario consentirà di classificare ulteriormente gli scenari per 1) gravità, 2) probabilità di occorrenza (derivando gli specifici alberi degli eventi e/o dei guasti), 3) peculiarità, 4) presenza a meno di misure in essere e tipologia delle stesse. In questo modo il pool degli scenari critici sarà ulteriormente ricondotto ed un sottoinsieme ben definito (la cui rappresentazione è univoca attraverso un albero concettuale di quel determinato incendio) di scenari significativi di riferimento e sviluppato secondo il paradigma generale della figura seguente (fig. 4.3 NFPA 550).



Tale rappresentazione consente, a partire da ciascun scenario critico, l'individuazione dei livelli di prestazione maggiormente significativi e le aree compensative che di conseguenza possono essere ipotizzate. Dal confronto di ciascun albero nella situazione "ante" e "post" mitigazione (eventualmente corredando l'albero delle informazioni principali in uscita dalla simulazione (semplificata o speditiva/approfondita) si ha l'immediata visualizzazione delle situazioni a supporto delle decisioni di competenza del progettista antincendio, degli stakeholders, della autorità aventi giurisdizione.

## 2.0 CASO STUDIO

Il caso studio impiegato per la verifica della metodologia di cui al precedente paragrafo è costituito da un edificio multipiano destinato ad uffici caratterizzato da una significativa presenza di occupanti (circa 600 persone). Per la caratterizzazione degli incendi dei quali effettuare la simulazione, FDS (Fire Dynamics Simulator) del NIST (USA) prevede che venga predisposto un modello descrittivo del dominio d'indagine e dell'incendio stesso. Il modello descrive gli oggetti (edifici, arredamenti, porte, finestre, ecc.) definendone caratteristiche geometriche e materiali, l'incendio o gli incendi presenti, caratterizzandoli sulla base della posizione e delle caratteristiche chimico-fisiche delle sostanze coinvolte. Al dominio d'indagine, o parte di esso, viene poi applicata una griglia tridimensionale composta da elementi a forma di parallelepipedo; diminuendo le dimensioni degli elementi si ottiene una simulazione più preciso al prezzo però di un maggior tempo di calcolo e di più elevate richieste in termini di potenza dell'hardware. Nello studio oggetto del presente articolo ha visto una prima fase esplorativa dove è stata costruita una griglia intorno all'edificio considerando un volume che eccede quello dell'edificio stesso di 2 metri per ogni lato, adottando elementi con lato di 50 cm. Successivamente lo studio è stato raffinato esaminando per ciascuno scenario solo le parti di edificio interessate dagli effetti dell'incendio, infittendo al contempo la griglia mediante l'utilizzo di elementi con lato di 25 cm. La selezione degli scenari critici significativi, rappresentativi della realtà in esame, è stata effettuata impiegando codici di calcolo semplificato per una verifica preliminare degli scenari di riferimento della norma rispetto i livelli di prestazione attesi. In particolare si è proceduto alla stima degli effetti dell'incendio mediante il codice FPETool del NIST (USA) ed alla stima dell'evacuazione in sicurezza degli occupanti unitamente alla verifica delle prestazioni del sistema di esodo mediante EVACNET4 dell'Università della Florida (USA). Sulla base dei risultati ottenuti si è deciso di procedere con un approfondimento di due scenari di incendio in particolare, descritti nel seguito.

Lo studio è stato condotto ipotizzando due scenari d'incendio:

- Scenario 1: incendio dovuto a corto circuito localizzato al terzo piano in prossimità della porta di accesso al vano scale centrale sul lato destro dell'edificio. Verifica dei livelli di prestazione in prossimità della scala principale presente nell'atrio e collegante tutti i piani dell'edificio, attualmente non compartimentata.
- Scenario 2: incendio dovuto a corto circuito localizzato al terzo piano in prossimità dell'involucro esterno dell'edificio, nelle vicinanze della scala esterna. Verifica del coinvolgimento dei piani superiori a seguito di un effetto secondario dell'incendio e del coinvolgimento della scala esterna di sicurezza.

Gli scenari sono stati esaminati per una durata di 30 minuti (al fine di ottenere informazioni preliminarmente per quanto attiene la sicurezza degli occupanti, stimata essere il primo obiettivo dell'indagine antincendio), e per entrambi gli scenari sono state ricavate le stesse informazioni.

Su tutto il dominio d'indagine sono stati ricavati:

- Isovolumi con temperatura superiore ai 50 °C;
- Potenza emessa dall'incendio.

Sono poi state raccolte informazioni puntuali al terzo, quarto e quinto piano sia al centro del vano scale centrale sia sul pianerottolo di accesso alla scala esterna, per un totale di sei punti, relativamente a:

- Visibilità in metri;
- Concentrazione di ossigeno;
- Concentrazione di monossido di carbonio;
- Concentrazione di anidride carbonica;
- Temperatura.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con i valori di soglia individuati dal progettista antincendio, che vengono riportati per completezza nella seguente tabella:

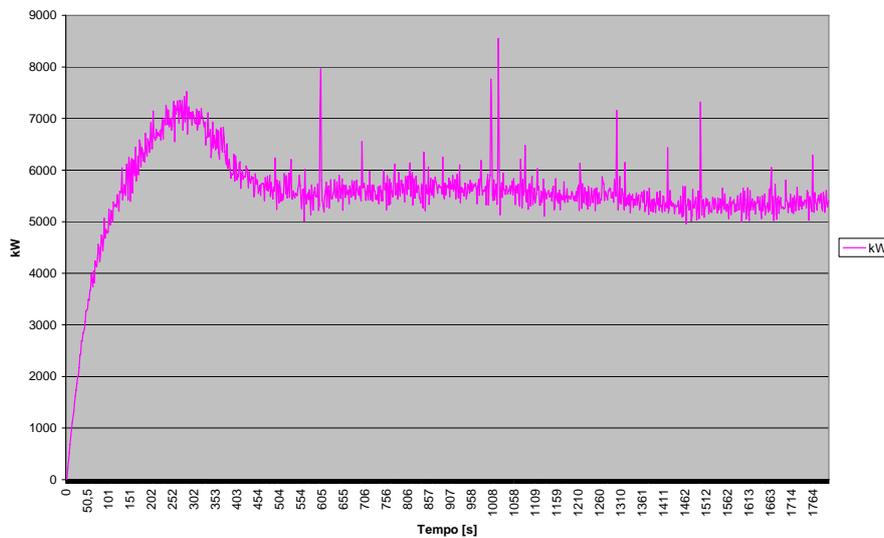
Tabella 2. Valori di prestazione

<b>Specie</b>	<b>Soglia di accettabilità</b>	<b>Descrizione</b>
Visibilità	9 m	Visibilità per oggetti illuminati da fonti esterne, corrispondente a circa 25 m per sorgenti luminose (si noti che la larghezza del piano terra è 16.8 m)
Ossigeno	15%	Primi segni di affaticamento
Monossido di carbonio	80 ppm	Primi segni di affaticamento (4000 ppm sono letali in meno di un'ora)
Anidride carbonica	0,5%	Limite di sicurezza per esposizione prolungata (la concentrazione del 3 % induce il raddoppio della frequenza respiratoria)
Temperatura	50 °C	In condizioni di umidità relativa inferiore al 50% corrisponde ad un tempo di tollerabilità di 2 ore

Sulla base dei dati analizzati sono stati poi generati dei grafici e delle rappresentazioni tridimensionali con lo scopo di analizzare più agevolmente i risultati delle simulazioni.

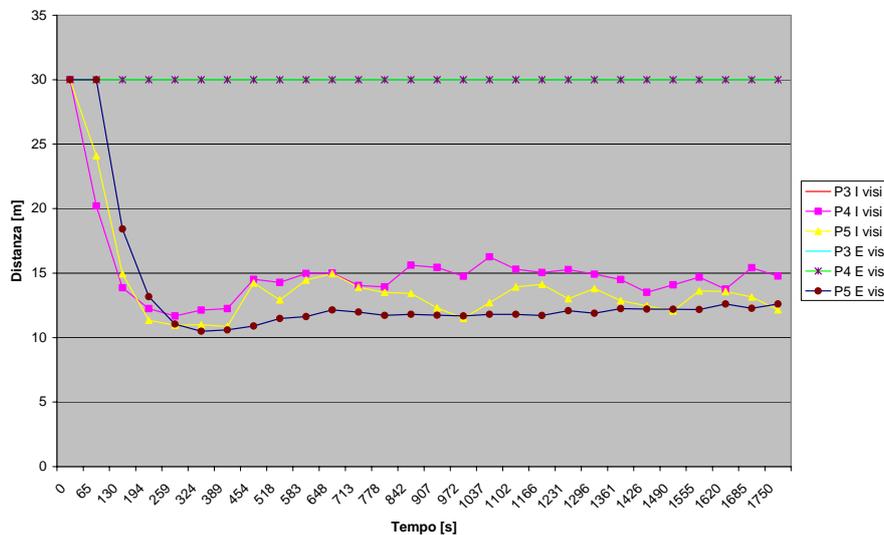
## Scenario 1

Si riportano di seguito i grafici rappresentativi dei risultati ottenuti.



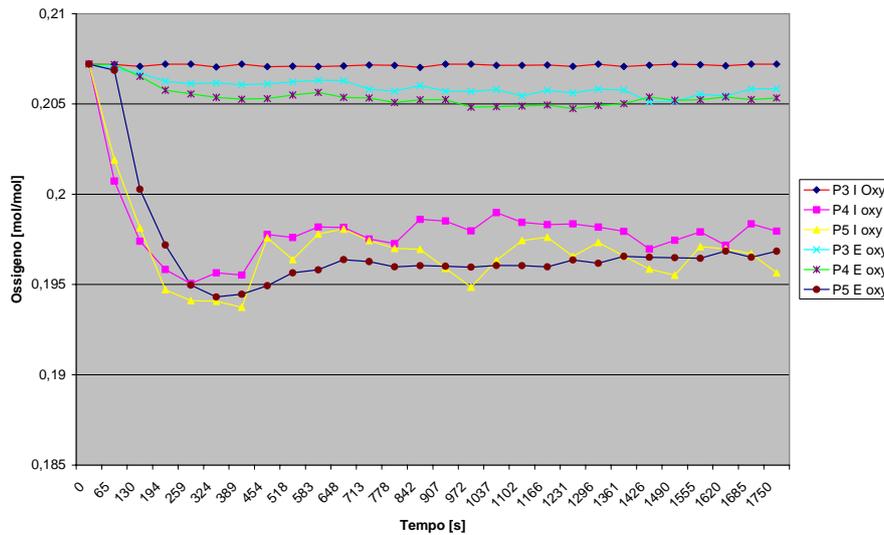
Potenza emessa

Come si può riscontrare, la potenza emessa raggiunge un picco di circa 7.500 kW dopo 4 minuti dall'inizio del propagarsi dell'incendio per poi attestarsi attorno ai 5.500 kW decrescenti.



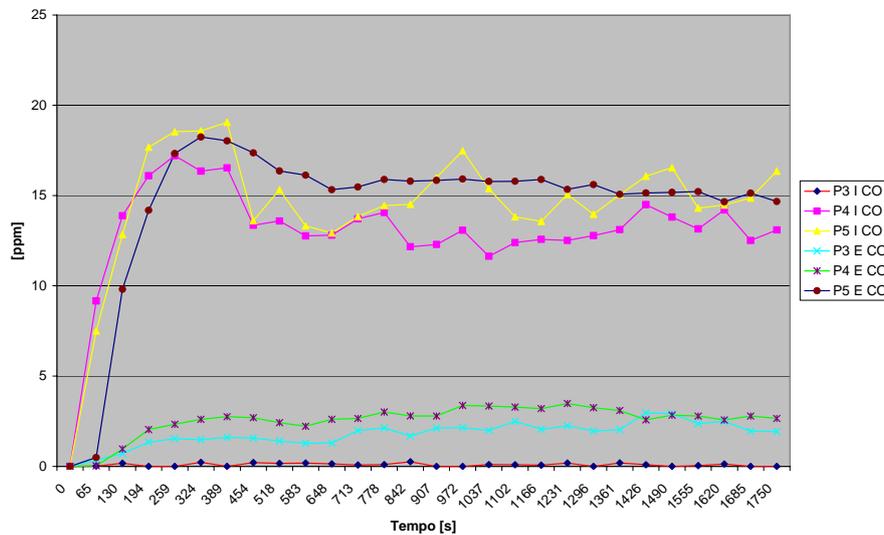
Visibilità

Il grafico della visibilità mostra le curve relative a ciascun punto considerato durante tutta la simulazione. Ciascun punto è caratterizzato da una sigla che ne indica la posizione, riportando piano e scala interessata. Così, ad esempio, "P3 I" indica piano numero 3 in prossimità della scala interna, mentre "P5 E" indica il piano numero 5 in prossimità della scala esterna. La stessa convenzione è stata utilizzata per tutti gli altri grafici riportati. Per quanto riguarda i risultati, il grafico mostra che la visibilità risulta sempre superiore a 10 metri, quindi superiore al limite di accettabilità di 9 m, e per i punti P3 I, P3 E, P4 E è addirittura pari a 30 m per tutta la durata della simulazione. Il punto dove la visibilità raggiunge i livelli mediamente più bassi è P5 E.



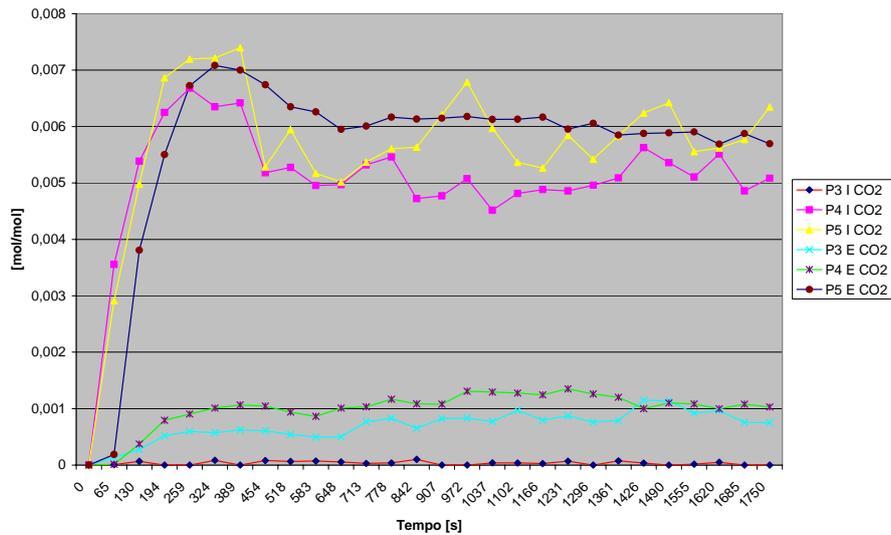
Concentrazione di ossigeno

La concentrazione di ossigeno non presenta valori particolarmente bassi nei punti esaminati, infatti si mantiene sempre su valori superiori al 19%, con un valore limite del 15%. I punti più critici risultano essere i due posti al quinto piano.



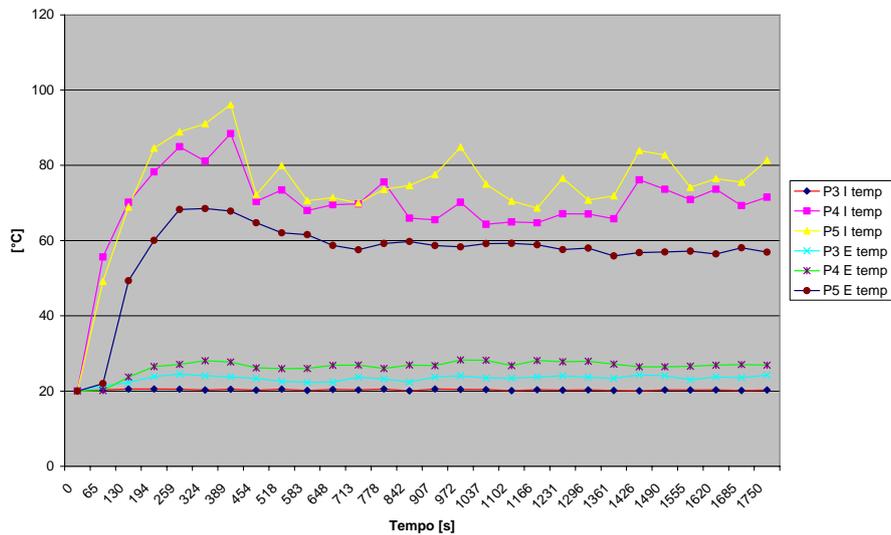
Concentrazione di monossido di carbonio

Anche la concentrazione di monossido di carbonio non raggiunge valori preoccupanti, arrivano al Massimo a circa 19 ppm, contro un valore limite di 80 ppm. Anche in questo caso i punti più critici sono i due posti al quinto piano e P4 I.



### Concentrazione di anidride carbonica

A differenza delle grandezze precedenti, la concentrazione di anidride carbonica supera per alcuni punti e per buona parte della simulazione il valore soglia dello 0,5%. Nello specifico, i punti interessati sono i due al quinto piano, per i quali la concentrazione supera per poco più di un minuto lo 0,7%, per poi attestarsi attorno allo 0,6%. Anche P4 I supera in alcuni punti il valore di 0,5% con un picco di circa 0,66%. Per gli altri punti, invece, la concentrazione rimane sempre al di sotto dello 0,2%. Si rileva comunque che, laddove il limite di soglia viene superato, i valori riscontrati risultano di poco superiori al limite stesso.

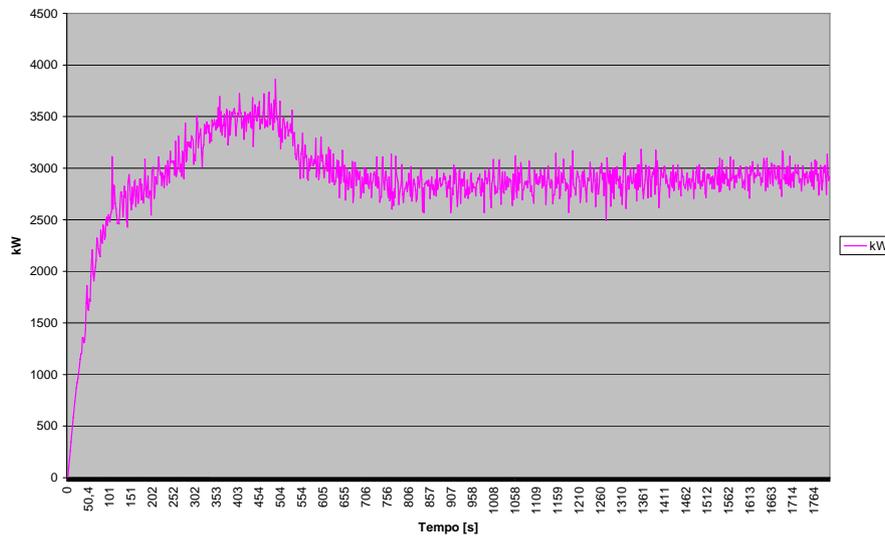


### Temperatura

L'analisi del grafico della temperatura evidenzia che il valore limite di 50 °C viene superato in alcuni punti per buona parte del tempo e che le temperature raggiunte lo superano in modo consistente. Il punto più critico in assoluto risulta essere P5 I, dove si riscontra un picco di 96 °C e valori che oscillano attorno ai 70 °C, andando a superare più volte gli 80 °C.

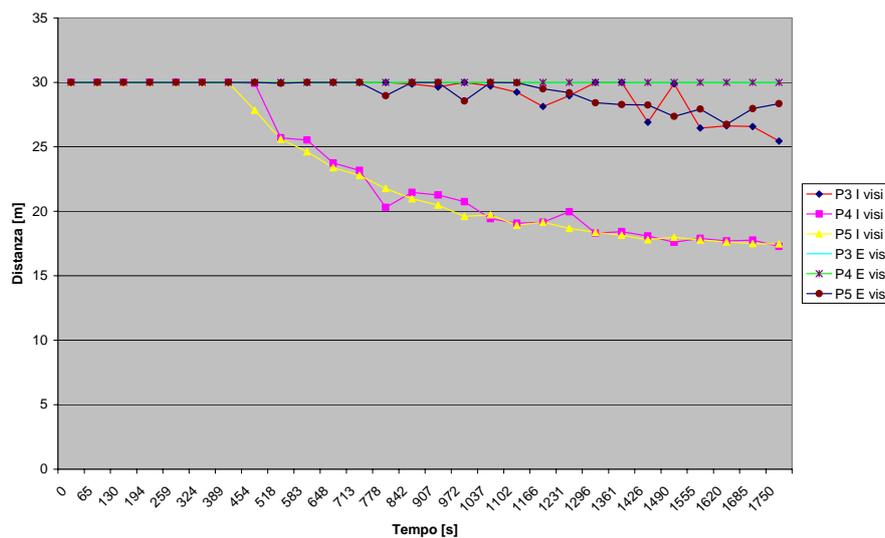
Il punto P4 I segue un andamento sostanzialmente uguale a quello di P5 I ma spostato verso il basso mediamente di circa una decina di °C. L'ultimo punto critico è P5 E, che vede inizialmente una temperatura di quasi 70 °C, per poi attestarsi attorno ai 60 °C con un andamento leggermente decrescente. Per gli altri punti esaminati le temperature non superano mai i 30 °C.

## Scenario 2



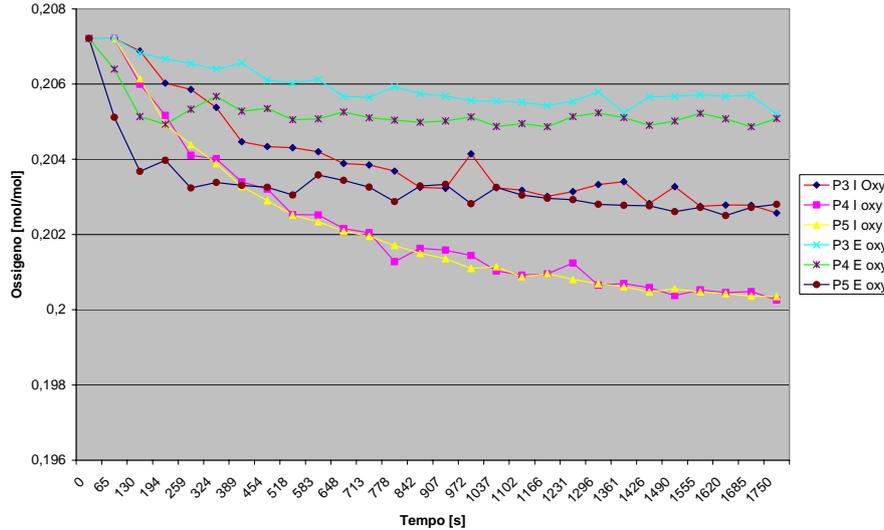
Potenza emessa

In questo caso la potenza emessa risulta essere molto minore per via della minore estensione dell'incendio; il valore di picco risulta infatti essere pari a circa 3.800 kW, mentre il valore sul quale il grafico si attesta oscilla attorno ai 2.800 kW.



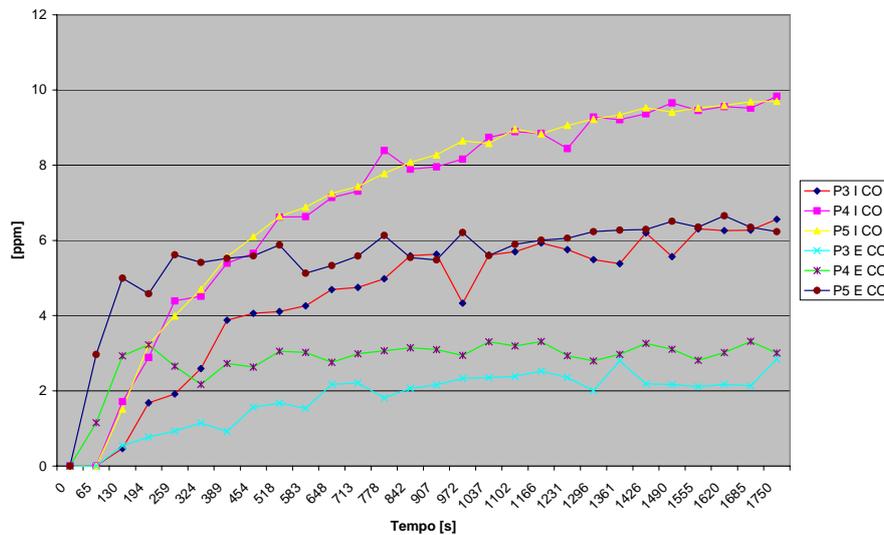
Visibilità

La visibilità si mantiene sempre e per tutti i punti al di sopra del valore di soglia di 9 m. I punti più critici da questo punto di vista risultano essere P4 I e P5 I, per i quali la visibilità scende fino a circa 17,5 m. Per tutti gli altri punti rimane sempre oltre i 25 m.



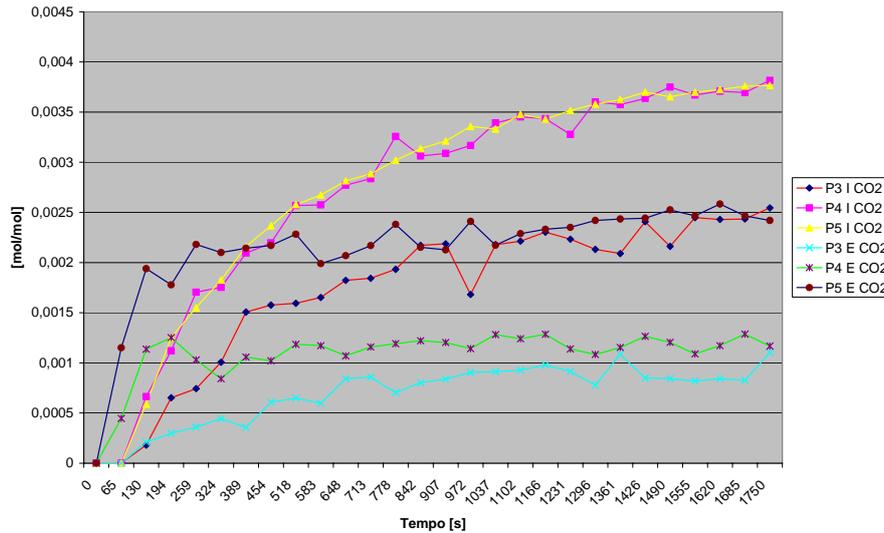
### Concentrazione di ossigeno

La concentrazione di ossigeno non presenta valori critici, in quanto risulta sempre essere al di sopra del 20%, con un andamento decrescente per tutti i punti esaminati. I punti dove assume i valori più bassi sono P4 I e P5 I, anche se la differenza tra i valori del punto con la concentrazione più bassa e quelli del punto con la concentrazione più alta è nell'ordine dello 0,4%, quindi non molto elevata.



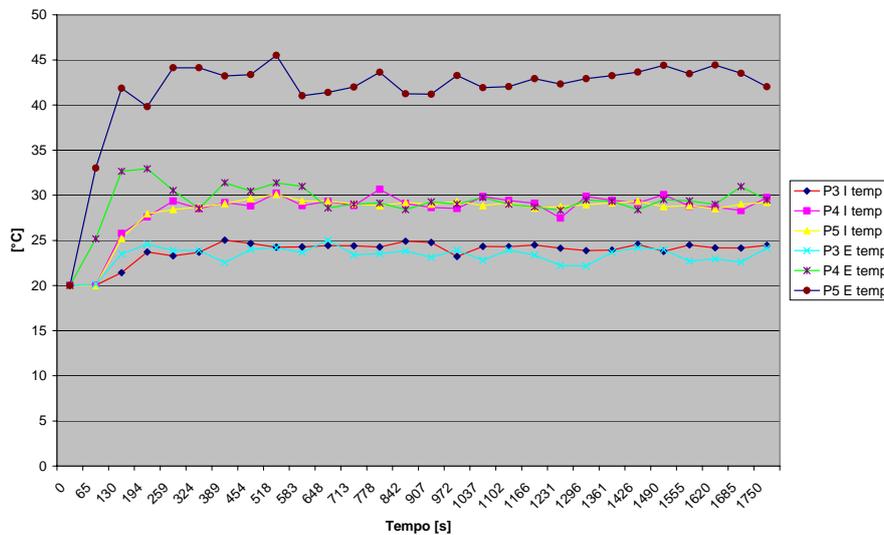
### Concentrazione di monossido di carbonio

I livelli di monossido di carbonio, aventi per tutti i punti esaminati andamento crescente, raggiungono un valore massimo di poco inferiore a 10 ppm per i punti P4 I e P5 I. I punti P3 E e P4 E, invece, presentano valori che oscillano tra 2 e 4 ppm. Tutti i valori riscontrati sono, quindi, largamente al di sotto della soglia di 80 ppm.



### Concentrazione di anidride carbonica

In questo scenario la concentrazione di anidride carbonica non raggiunge mai il livello di soglia dello 0,5%. I punti dove si rilevano i valori più elevati sono P4 I e P5 I, con valori che arrivano a poco meno dello 0,4%. Per P3 I e P5 E vengono raggiunti valori pari a circa 0,25%, mentre P3 E e P4 E non raggiungono neanche lo 0,15%.



### Temperatura

Lo scenario esaminato non causa il raggiungimento di temperature superiori ai 50 °C nei punti considerati. Il punto interessato dalle temperature più elevate è P5 E, dove la temperatura si mantiene tra i 40 e i 45 °C praticamente per tutta la durata della simulazione. P4 I, P5 I e P4 E sono interessati da temperature generalmente leggermente inferiori a 30 °C, mentre P3 E e P3 I vedono temperature comprese tra 20 e 25 °C.

### 3.0 CONCLUSIONI

L'approccio presentato in questo manoscritto sottolinea l'importanza della analisi del rischio di incendio quale strumento fondamentale per 1) la determinazione del livello di sicurezza antincendio (e di conseguenza la vulnerabilità all'incendio) di un manufatto edilizio che non può essere gestito tout-court mediante un approccio classico di tipo prescrittivo; 2) la individuazione dei layer di protezione maggiormente opportuni a seguito della verifica delle prestazioni del manufatto rispetto problematiche specifiche ritenute rappresentative, significative e credibili; 3) la ottimizzazione del flusso di lavoro dell'intera progettazione antincendio; 4) una migliore presentazione dei risultati al committente ed alle autorità aventi giurisdizione, attori che, a seguito dell'introduzione dell'analisi di rischio, sono in grado di acquisire e valutare in modo efficace i termini in ingresso alla simulazione di approfondimento; 4) l'individuazione delle problematiche da approfondire mediante l'impiego di strumenti di calcolo quali i codici CFD. La metodologia seguita, costituita da fasi di analisi rigorose e a differente grado di approfondimento, consente la valutazione integrata degli aspetti significativi di criticità, selezionati a partire da una indagine preliminare che può essere condotta per ciascuna problematica con un modello 'speditivo' ad-hoc che vanno a comporre il pool degli scenari di riferimento per un progetto antincendio. Tale modus operandi guida in modo automatico il progettista ad assumere, a tutti gli effetti, il ruolo di 'analista del rischio di incendio', che, in considerazione di un criterio ALARP, è chiamato ad individuare, nell'ambito del proprio studio, il rischio associato alle unità caratteristiche del manufatto edilizio, eventualmente procedendone alla riduzione pesata al fine di trarre il criterio di accettabilità del rischio fornito dalle autorità o dalle norme di riferimento e tenendo in considerazione i costi associati a ciascuna misura ulteriore di mitigazione del rischio per una valutazione costi-benefici attesi da parte degli stakeholders.

### RIFERIMENTI

- [1] "Performance based fire engineering". Fiorentini, L., Rossini, V., Coppola, G., Ferrari, A., Atti del Convegno "5<sup>th</sup> International Conference on Performance Based Codes and Fire Safety Design Methods", Society of Fire Protection Engineers, 6-8 Ottobre 2004, European Commission Facilities, Lussemburgo.
- [2] "An Introduction to Fire Dynamics, 2nd Edition", D.D. Drysdale, Ph.D., John Wiley & Sons Publisher.
- [3] "An Introduction to Mathematical Fire Modeling" Marc L. Janssens, Ph.D.
- [4] "Enclosure Fire Dynamics Bjorn Karlsson and James G. Quintiere, 1999.
- [5] "Evaluation of Fire Safety" D. Rasbash, G. Ramachandran, B. Kandola, J. Watts, M. Law.
- [6] "Fire Protection Engineering in Building Design" ane Lataille, FSFPE, P.E.
- [7] "Ignition Handbook" Vytenis Babrauskas, Ph.D.
- [8] "Industrial Fire Protection Engineering" Robert G. Zalosh.
- [9] "Introduction to Performance-Based Fire Safety" Richard L.P. Custer and Brian J. Meacham, 1997.
- [10] "Principles of Fire Behavior" James G. Quintiere, P.E.
- [11] Risk-Informed Performance-Based Industrial Fire protection" Thomas F. Barry, P.E.
- [12] "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition" SFPE.
- [13] "Loss prevention in the process industries – Hazard identification, assessment and control" Less F.P., Butterworth Heinemann, Oxford, 1996.
- [14] "Engineering Guide – Human Behavior in Fire" June, 2003. SFPE.
- [15] A. N. Beard "Short communication on Requirements for an acceptable model use" Fire Safety Journal 40 (2005) pagg. 477/484.
- [16] "Selection of design fires in evacuation safety designs of buildings based on fire risk concept., T. Takeyoshi, J. Yamaguchi, 7th Asia-Oceania Symposium for Fire Safety Science, 2007.
- [17] NFPA 550 "Guide to the Fire Safety Concept Tree", Edizione 2007, National Fire Protection Association
- [18] NFPA 551 "Evaluation of Fire Risk Assessments", Edizione 2007, National Fire Protection Association
- [19] NFPA 101 "Life Safety Code", Edizione 2006, National Fire Protection Association
- [20] ISO/TR 13387 "Fire Safety Engineering" Parti 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, Edizione 1999, International Organization for Standardization

- [21] BS 7974:2004 "Application of fire safety engineering principles to the design of buildings", Edizione 2004, British Standards Institute
- [22] Decreto del Ministro dell'interno 9 maggio 2007 (G.U. n. 117 del 22/05/2007), "Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio"
- [23] Decreto del Ministero dell'interno 9 maggio 2007, "Linee guida per la valutazione dei progetti", Allegato alla lettera circolare n. DCPST/427 (Osservatorio per l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio) del 31/03/2008