

STABILIMENTI INDUSTRIALI E FIRE MODELS

dott. ing. Pier Nicola Dadone*, dott. ing. Mariano Largher°

* Comando VVF Bergamo, via Codussi 9, 24124 Bergamo, e-mail: pierdado@tin.it

° Scuola Provinciale Antincendi, Provincia Autonoma di Trento, via Secondo da Trento 1, 38100 Trento, e-mail: largher.mariano@virgilio.it

SOMMARIO

Il presente lavoro intende esaminare le problematiche di prevenzione incendi relative a stabilimenti industriali mediante modelli d'incendio (fire models). Si utilizza l'approccio ingegneristico alla protezione dagli incendi, o fire safety engineering, al fine di esaminare problematiche altrimenti non analizzabili ed ottenere informazioni di progettazione e verifica delle condizioni di sicurezza.

Si è sviluppata una metodologia generale di studio, organizzata in sette fasi successive e parzialmente cicliche.

Quindi si è realizzato uno studio relativo ad uno stabilimento industriale di grande estensione, organizzato in diversi compartimenti e dotato di impianto sprinkler ed evacuatori di fumo e calore.

Si sono definiti e quantificati gli obiettivi, si sono esaminati gli scenari d'incendio, è scelto il modello d'incendio a zone CFAST, si sono definiti i casi da studiare, illustrando i dati di input e le semplificazioni presenti. Si sono quindi analizzati i risultati in funzione degli obiettivi. Infine si è realizzato il controllo di verosimiglianza.

2. I FIRE MODELS

La prevenzione incendi, intesa come apprestamento di misure di prevenzione e protezione attiva e passiva, si basa in Italia principalmente su un corpo di norme di tipo prescrittivo, che indicano per i vari tipi di attività quali sono le caratteristiche delle misure da adottare (per esempio, delle vie di esodo, della resistenza al fuoco, o dei sistemi di smaltimento dei fumi). Tale approccio è presente del resto negli altri paesi europei ed extraeuropei, ed indica le misure da adottare partendo dalle caratteristiche di partenza dell'attività.

Quello che invece non viene esplicitato, anche se ne costituisce il presupposto, sono le prestazioni di sicurezza da conseguire. Ad esempio, date alcune caratteristiche di un albergo sono normate le caratteristiche delle vie di esodo; non esplicitate sono invece le condizioni di esodo in sicurezza che si intendono accettare (presenza o meno di fumi, livello dei fumi, tempo a disposizione per uscire, influenza effettiva sui tempi di esodo di variabili quali la presenza di un sistema di rilevazione d'incendio ...).

Una linea d'azione degli ultimi anni in Italia è stato quello di redigere norme di tipo prescrittivo che colmassero lacune prima presenti. Tuttavia un'altra strada per conseguire la sicurezza antincendi si è sviluppata in questi anni, soprattutto nel mondo anglosassone. Si tratta dell'approccio ingegneristico alla protezione dagli incendi, o fire safety engineering, o anche sicurezza di tipo prestazionale.

In sostanza, per un determinato fabbricato o attività (uno specifico teatro, complesso sportivo, o qualsivoglia altro luogo) vengono stabiliti preventivamente degli obiettivi di sicurezza, da concordarsi in qualche maniera con l'autorità di controllo. Ad esempio un obiettivo di sicurezza può essere l'esodo in spazio fisico senza fumo al di sotto di una certa quota e con certa velocità adeguata al tipo di pubblico. Quindi si effettuano degli studi di tipo ingegneristico per stabilire se tali obbiettivi sono raggiunti, e a quali condizioni.

Come è facile immaginare, la difficoltà sta nella modellazione dell'incendio. A differenza, ad esempio, della scienza delle costruzioni, dove i metodi di calcolo di una struttura si basano interamente su teorie analitiche (corpo elastico, anelastico e così via), il fenomeno incendio purtroppo presenta delle complicazioni notevoli legate sia ai fenomeni chimico-fisici che all'influenza delle condizioni al contorno.

Il risultato è che nei modelli sviluppati in questi anni sono presenti anche formule empiriche, e la fedeltà del modello al caso reale è limitata ad ambiti ristretti. Principalmente i modelli sviluppati esaminano lo sviluppo di un incendio (e dei suoi prodotti calore, gas, fumi) in un numero limitato di ambienti predefiniti, e richiedono ovviamente l'impiego di mezzi informatici più o meno potenti. Se i Computer Fire Models vengono applicati ad ambienti troppo complicati i risultati possono essere molto instabili e poco fedeli alle simulazioni reali.

I modelli di calcolo d'incendio si dividono in due famiglie: i modelli di campo e i modelli a zone. I primi utilizzano sistemi di calcolo agli elementi finiti applicati alla fluidodinamica, con oneri di implementazione e di calcolo notevolissimi. I secondi dividono lo spazio in aree omogenee che risultano correlate tra loro per lo più da formule empiriche, e sono al momento quelli più utilizzati.

Si rimanda alla bibliografia per la trattazione teorica generale della modellazione d'incendio [1] [2].

3. METODOLOGIA DI STUDIO

Si adotta un processo di analisi e progetto basato su sette fasi:

- A. Valutazione della situazione di progetto (descrizione dello stabilimento industriale)
- B. Definizione degli obiettivi
- C. Quantificazione degli obiettivi (obiettivi di progetto)
- D. Sviluppo degli scenari d'incendio e selezione degli incendi di progetto
- E. Sviluppo e valutazione dei risultati di calcolo, con criteri di accettabilità e controllo di verosimiglianza
- F. Selezione e documentazione del progetto finale
- G. Preparazione e installazione delle specifiche.

Le prime cinque fasi sono sviluppate nel seguito del presente lavoro. Una opportuna ripetizione delle cinque fasi nonché le ultime due sono lasciate a sviluppi successivi.

4. DESCRIZIONE DELLO STABILIMENTO INDUSTRIALE (FASE A)

Si intendono applicare le metodologie della Fire Safety Engineering ad un caso di stabilimento industriale di grande estensione, in cui avviene la fabbricazione e lo stoccaggio di pneumatici. Lo stabilimento è organizzato in un unico corpo di fabbrica, di pianta quasi rettangolare, di superficie circa pari a 30.000 mq, con sette compartimenti, di dimensione da 1600 mq a 6260 mq, ed altezza libera di 8 metri. Tra i vari compartimenti vi sono muri, porte e portoni resistenti al fuoco, nonchè barriere a lama d'acqua.

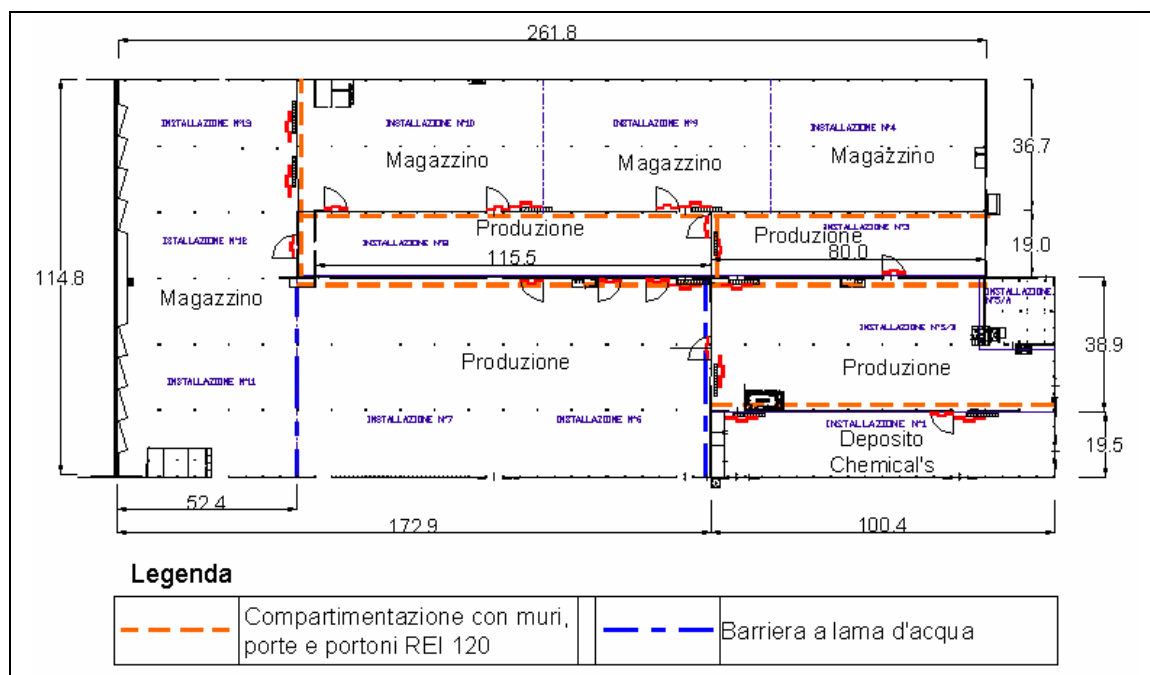


Fig. 1. Planimetria stabilimento

E' presente un impianto di spegnimento automatico sprinkler a copertura di tutta l'attività, con le caratteristiche sotto riportate.

Le aperture di aerazione dei vari compartimenti sono costituite da finestre fisse, finestre apribili elettricamente ed Evacuatori di Fumo e Calore. Gli evacuatori di fumo sono costituiti da serramenti sub-verticali posti sulla copertura che si aprono quando entra in funzione l'impianto sprinkler. Nel momento in cui si attiva una testina erogatrice di una zona, viene inviata acqua ai pistoni attuatori di tutti di evacuatori sottesi da quella zona. E' anche possibile azionare l'apertura manualmente dall'esterno agendo su apposite leve ubicate in corrispondenza di ogni sistema di valvole di zona. Tali saracinesche sono poste all'esterno.

Comparto	Temperatura intervento testine (°C)	Densità di scarica (mc/sec)	Superficie EFC
1	141	0,0004	90
2	141	0,0004	75

3	68	0,0001333	15
4	141	0,0004	15
5	68	0,0001333	7.5
6	68	0,0001333	37.5
7	141	0.0002083	22.5

Tab. 1. Caratteristiche impianti sprinkler ed EFC

5. DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI (FASE B)

Le finalità scelte della modellazione sono:

- Valutare nei vari compartimenti l'evoluzione dell'incendio con o senza sprinkler, con o senza EFC.
- verificare le condizioni di esodo delle persone all'interno del fabbricato quando scoppia l'incendio
- verificare le condizioni della stabilità delle strutture portanti in relazione all'andamento dell'incendio.
- verificare l'opportunità di predisporre ulteriori evacuatori di fumo e calore rispetto a quelli previsti inizialmente.

6. QUANTIFICAZIONE DEGLI OBIETTIVI (OBIETTIVI DI PROGETTO) (FASE C)

Tra gli obiettivi indicati nella fase precedente si individuano l'esodo e la resistenza al fuoco come quelli quantificabili e da verificare nel primo ciclo di analisi.

Si intende verificare:

- a) se in caso di incendio l'esodo avviene in condizioni di sicurezza. Comunque si considera un tempo di dieci minuti come tempo ampiamente sufficiente per l'esodo delle persone.
- b) se in caso d'incendio l'intervento degli sprinkler e dei sistemi di smaltimento fumi sono in grado di limitare l'incendio ed impedire che le strutture del fabbricato siano danneggiate. Si dà per scontato che il mancato intervento degli sprinkler in caso di incendio conduca al danneggiamento delle strutture.

Al fine delle verifiche a) e b) si adottano i seguenti parametri:

- a) il tempo necessario perché lo strato superiore, occupato dal fumo e dai gas caldi di combustione, scenda ad una altezza di 3,5 m dal suolo. Si è ritenuto che per una altezza inferiore di 3,5 m non fosse più garantito l'esodo in condizioni di piena sicurezza.
- b) Ai fini della valutazione della stabilità delle strutture portanti del fabbricato, costituite da tralicci metallici, si può utilizzare quale parametro più semplice la temperatura critica presente nella pubblicazione CNR [5] dove nel caso di struttura in acciaio il valore di temperatura critica è pari a 350 °C.

Tali parametri saranno comunque ripresi e approfonditi nel capitolo dei Criteri di Accettabilità.

7. SVILUPPO DEGLI SCENARI D'INCENDIO E SELEZIONE DEGLI INCENDI DI PROGETTO (FASE D)

7.1 Scelta del modello

Per il presente studio si è scelto un modello a zone, in quanto vantaggioso sotto molteplici aspetti:

- buon adattamento alla configurazione fisica dello stabilimento
- possibilità di effettuare agevolmente varie simulazioni modificando alcuni parametri
- risultati di output utili per la progettazione antincendio

Si è utilizzato il programma CFAST, elaborato dal Nist (National Institute of Standards and Technology) statunitense. Si tratta di un programma di calcolo a zone elaborato dall'ente governativo Nist a seguito di studi di simulazione del fenomeno incendio iniziati da Richard W. Bukowski P.E. del Nist nel 1984. Da allora le equazioni di base e le condizioni al contorno sono state via via valutate in relazione a casi d'incendio reali effettuati in appositi laboratori sempre del Nist. Attualmente l'insieme delle relazioni è organizzato in un programma di simulazione denominato CFAST [3]. La versione utilizzata nel presente lavoro è la versione CFAST 3.1.6.

Il programma CFAST è un modello a due zone usato per calcolare l'evoluzione della distribuzione del fumo, dei gas di combustione e la temperatura in un fabbricato durante un incendio. Il programma si basa sulla risoluzione di un sistema di equazioni che predicono varie variabili di stato.

Il modello CFAST è stato soggetto ad un ampio campo di confronti con dati sperimentali: è stato confrontato con incendi di compartimenti singoli, di più compartimenti ad un solo piano, di un fabbricato a sette piani, di grandi hanger per aeroplani.

Ciascuna stanza (compartimento) è diviso in due strati, lo strato superiore e lo strato inferiore. Nel due strati i vari parametri chimico-fisici sono uniformi (temperatura, spessore strato, caratteristiche fumi e gas, etc), ed ovviamente variano nel tempo secondo l'evoluzione dell'incendio.

Il modello CFAST prevede scambi di gas/fumi e calore attraverso aperture di vario genere da definire come input, tra i vari compartimenti e tra i compartimenti e l'esterno.

Nel modello non è presente un modello di crescita dell'incendio vero e proprio, bensì vi è una scelta di curve di crescita d'incendio, da determinare in base alla tipologia di materiali presenti.

Le varie fasi dell'inserimento dei dati relativi al fabbricato preso in oggetto, quindi le varie ipotesi incidentali considerate ed infine i risultati dell'elaborazione del programma sono illustrati nel seguito.

In merito alle condizioni di estinzione dell'incendio il modello CFAST comprende anche una modellazione della fase di azione dell'impianto sprinkler e quindi della fase di soppressione dell'incendio. Tuttavia tale modellazione appare meno soddisfacente ed affidabile (come in tutti i modelli a zone attualmente disponibili [1]), e pertanto è opportuno assumere che l'impianto sprinkler interrompa la crescita dell'incendio e abbassi la temperatura, senza determinare necessariamente l'estinzione completa dell'incendio.

7.2 Le condizioni iniziali (dati di input)

L'organizzazione spaziale dello stabilimento industriale è stata simulata mediante sette comparti a forma di parallelepipedo, come illustrato nella fig. 2. I comparti utilizzati sono definiti mediante i parametri previsti dal programma CFAST. In particolare per ogni comparto sono definiti:

- Le tre dimensioni del parallelepipedo
- le aperture verticali e/o orizzontali verso l'esterno (dimensioni e posizionamento) costituite da finestre, porte, ecc.
- le aperture verticali e/o orizzontali verso altri compartimenti (dimensioni e posizionamento) costituite da porte, finestre, ecc.
- conducibilità delle superfici del parallelepipedo, intensità e direzione del vento (per tali parametri si adottano parametri standard)
- presenza e caratteristiche dell'impianto sprinkler (in particolare temperatura di intervento e parametri di risposta alla sollecitazione termica)
- Presenza e caratteristiche di sistemi di smaltimento fumi.

Si sottolinea che i comparti intesi dal CFAST non coincidono affatto con i compartimenti antincendio conosciuti nella prevenzione incendi. Infatti i comparti CFAST sono da intendere come parallelepipedi in cui sui vari lati sono possibili aperture libere verso l'esterno o verso altri comparti.

Inoltre le parti chiuse dei vari lati impediscono il passaggio del fumo, ma non sono fatte simulazioni in merito alla resistenza al fuoco delle strutture stesse dei comparti. Per tali problematiche è necessario fare valutazioni e considerazioni a margine della simulazione principale.

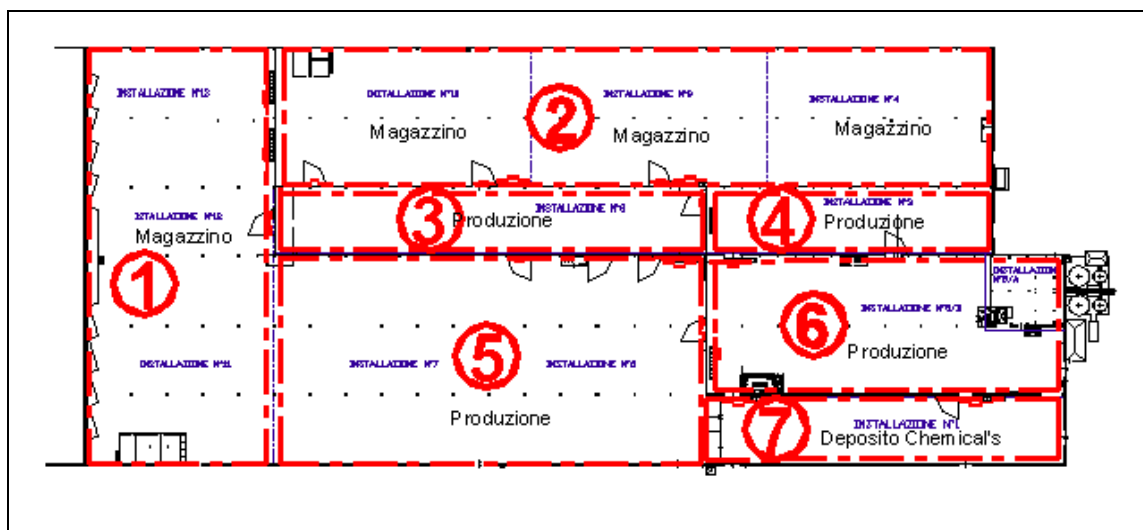


Fig. 2. Schema suddivisione comparti per le simulazioni numeriche

Nel caso specifico si sono fatte le seguenti scelte:

- La simulazione dura 10 minuti, un tempo ampiamente sufficiente per valutare le condizioni di esodo delle persone e l'andamento dell'incendio in relazione agli sprinkler e ai sistemi di smaltimento fumi.
- Si sono considerate le aperture verticali verso l'esterno (porte, finestre) come chiuse (salvo la successiva apertura degli evacuatori di fumo e calore). Tale caso è peggiorativo in quanto, come vedremo, nei primi 10 minuti l'incendio non subisce limitazioni a causa di carenza di ventilazione (i compartimenti sono molto grandi) e quindi l'assenza di aperture verticali verso l'esterno determina un mancato flusso di fumi verso l'esterno, peggiorando la situazione all'interno del compartimento.
- Le porte interne tra i compartimenti sono state considerate aperte: tale caso corrisponde all'ipotesi che in caso di incendio le varie porte, nei primi minuti, vengano aperte per la fuga delle persone. Inoltre, essendo le porte alte soltanto 2 m dal suolo, non si hanno effetti migliorativi di smaltimento fumi in altri compartimenti, almeno negli ipotizzati primi 10 minuti.
- Le barriere a lama d'acqua sono considerate non operative: tale condizione è peggiorativa, quindi cautelativa.
- Poiché tutta la superficie dello stabilimento considerato è coperta da un impianto di spegnimento automatico a sprinkler, si sono considerati i due casi di non funzionamento dell'impianto sprinkler e di funzionamento dell'impianto stesso.
- Si esaminano i due casi di intervento sprinkler ed evacuatori congiunto, come prevedibile nella realtà, e solo intervento sprinkler senza intervento degli evacuatori. Questo secondo caso è considerato per comunque valutare cosa avviene in tale situazione, e ricavare conferme generali sul modello.

7.3 Incendio di progetto

Per la fase di incendio crescente il programma CFAST utilizza diverse possibilità di relazione HRR/tempo, a sua volta frutto di studi sull'andamento degli incendi.

Le relazioni più utilizzate sono andamenti di tipo parabolico. Nel caso specifico si ritengono adeguate tali relazioni in quanto simulano la situazione molto comune di progressivo allargamento dell'incendio in un generico magazzino con materiale combustibile sparso. La formula generale è:

$$HRR = a \cdot (t)^2 \quad (1)$$

in cui **HRR** è il Rilascio di calore nell'unità di tempo, o Heat Release Rate, in KWatt, **t** è il tempo, in secondi, **a** è il coefficiente di HRR, kWatt/(secondi)².

Tipo di incendio	a (kW/s)
Incendio lento (incendio di pezzi di legno di grossa pezzatura, ecc)	0,0029
Incendio medio (incendio di legno, plastica, gomma, in pezzatura di media dimensione)	0,0117
Incendio veloce (carta, legno, plastica, in piccola pezzatura e facile ventilazione)	0,0469
Incendio ultraveloce (incendio di liquidi infiammabili)	0,1875

Tab.2. Valori standard di **a** (coefficiente di HRR)

Nel caso specifico si è adottata la curva "ultraveloce", considerata come l'ipotesi più gravosa (il tipo di materiali presenti è più vicino a velocità medie, per i pneumatici, e a velocità veloci, per mescole e simili).

Abbiamo quindi effettuato un primo calcolo, al fine di rispondere alla seguente domanda: nell'arco dei 10 minuti della simulazione, in caso di assenza di limiti di ventilazione, l'incendio risulta sempre crescente, oppure può verificarsi anche il caso di stabilizzazione per limite di combustibile?

Abbiamo valutato la durata di un incendio generalizzato, utilizzando come parametro di partenza il carico d'incendio. Non si considera, ovviamente, alcun tipo di intervento, attivo o passivo, volto all'estinzione dell'incendio.

Il carico d'incendio è stato dapprima preso in considerazione per valutare la superficie massima di combustibile esposta all'incendio, e poi la durata dell'incendio nell'ipotesi di ventilazione non limitata.

Si è effettuato un calcolo approssimativo della superficie esposta in ogni compartimento del materiale stoccato, principalmente pneumatici: si è pertanto valutato la pezzatura dei pneumatici, il loro modo di stoccaggio, ecc., infine assumendo tale superficie come pari alla superficie in pianta.

Quindi, utilizzando una velocità di combustione del pneumatico si è provveduto a stimare quanto tempo servisse per consumare completamente il combustibile stesso, ipotizzando la combustione fin dall'inizio su tutta la superficie esposta, senza limiti di ventilazione, con l'evento del flashover.

I risultati determinati sono esposti nella tabella seguente.

comparto	Superficie comparto (mq)	Carico d'incendio (kg legna/mq)	Superficie ipotizzata esposta di combustibile (mq)	Tempo occorrente per combustione completa senza limiti di ventilazione (minuti)
1	7400	91	7400	91
2	6260	572	6260	572
3	2300	169	2300	169
4	1600	72	1600	72
5	1900	64	1900	64
6	4200	466	4200	466
7	2000	578	2000	578

Tab. 3. Combustione senza limiti di ventilazione

I calcoli effettuati sono molto approssimativi, con grossi margini d'incertezza; servono però soltanto per ottenere dei valori di riferimento e controllo, che permettono di concludere che sicuramente nell'arco dei 10 minuti della simulazione l'incendio non risulta limitato dal combustibile.

8. SVILUPPO E VALUTAZIONE DEI RISULTATI DEL CALCOLO (FASE E)

8.1 Matrice delle simulazioni

Al fine di eseguire una modellazione esaustiva dei possibili incendi che si possono verificare nello stabilimento è necessario effettuare numerose simulazioni adottando origine dell'incendio e condizioni di ventilazione diverse. Si elencano i casi esaminati.

comparto in cui ha origine incendio	No sprinkler, no EFC	sì sprinkler, no EFC	sì sprinkler, sì EFC
1	X	X	X
2	X	X	X
3	X	X	X
4	X	X	X
5	X	X	X
6	X	X	X
7	X	X	X

Tab. 4. Matrice delle simulazioni

8.2 Tempo disponibile per l'esodo

L'esito delle prove, in relazione alla verifica delle condizioni di esodo, è il seguente.

comparto in cui ha origine incendio	no sprinkler, no EFC	sì sprinkler, no EFC	sì sprinkler, sì EFC
1	> 600	> 600	> 600
2	520	> 600	> 600
3	300	320	> 600
4	240	240	240
5	> 600	> 600	> 600
6	380	> 600	> 600
7	290	290	290

Tab. 5. Tempo disponibile da inizio incendio per l'esodo in sicurezza (secondi)

Dai vari casi esaminati si evince che lo strato superiore, occupato dal fumo, si abbassa sempre con tempi che paiono compatibili con l'esodo, superiori ai 4 minuti (si controlla inoltre che lo strato inferiore mantenga comunque condizioni di "abitabilità", con riferimento a temperatura e quantità di monossido di carbonio). Nel seguito verificheremo meglio le condizioni dell'esodo in sicurezza.

Si constata anche che l'azione di sprinkler e EFC non modifica sensibilmente i tempi massimi disponibili per l'esodo, salvo che per i compartimenti 3 e 6. Ciò è facilmente spiegabile intuitivamente considerando che nei compartimenti 3 e 6 (oltre che nel 5) vi sono sprinkler che si attivano a 68° C, mentre negli altri compartimenti gli sprinkler si attivano solo a 141° C.

comparto in cui ha origine incendio	tempi di intervento degli sprinkler (e degli EFC) in secondi
1	478
2	525
3	264
4	365
5	295
6	284
7	388

Tab. 6. Tempi di intervento degli sprinkler (e degli EFC) nei vari casi d'incendio.

8.3 Andamento della temperatura

In merito invece alla resistenza al fuoco si procede esaminando il dato della temperatura massima dello strato superiore nei vari casi di incendio considerati. I valori sono elencati nella sottostante tabella, considerando il caso di intervento degli sprinklers. L'intervento degli evacuatori di fumo e calore non determina invece una significativa modifica della temperatura massima, come verificabile dalle prove effettuate.

comparto in cui ha origine incendio	Temperatura massima dello strato superiore (° C)
1	170
2	171
3	120
4	205
5	101
6	107
7	210

Tab. 7. Temperatura massima dello strato superiore

Si constata che le temperature raggiunte non sono molto elevate e comunque sono tali per pochi minuti (il modello CFAST valuta l'abbassamento di temperatura nei due strati determinato dall'intervento degli sprinkler).

8.4 Grafici

Nelle figure che seguono si illustrano graficamente le variazioni nel tempo di alcune grandezze considerando sempre il caso di nascita dell'incendio nel comparto stesso (caso più gravoso).

Si illustra l'andamento dell'HRR nel caso di incendio nel comparto 1. L'andamento dell'HRR con nascita dell'incendio negli altri comparti è simile, dove il termine fondamentale che muta è il tempo in cui avviene l'intervento degli impianti sprinkler ed EFC.

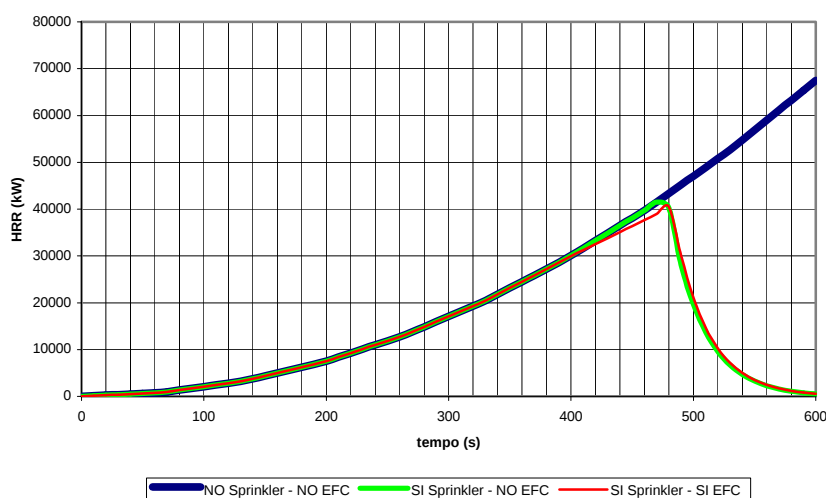


Fig. 3. Andamento HRR comparto 1

Si illustra poi l'andamento della temperatura dello strato superiore e l'altezza dal suolo del piano di separazione dei due strati nel caso di incendio nei compartimenti 1, 3 e 6.

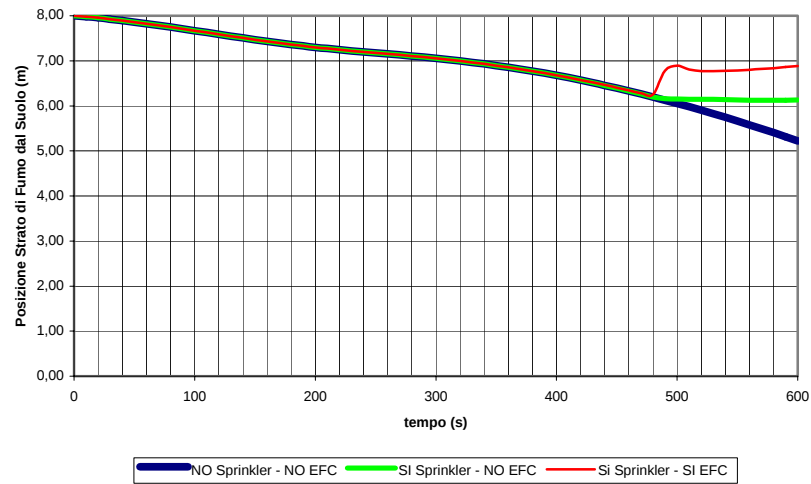


Fig. 4. Altezza dal suolo dello strato di fumo in compartimento 1

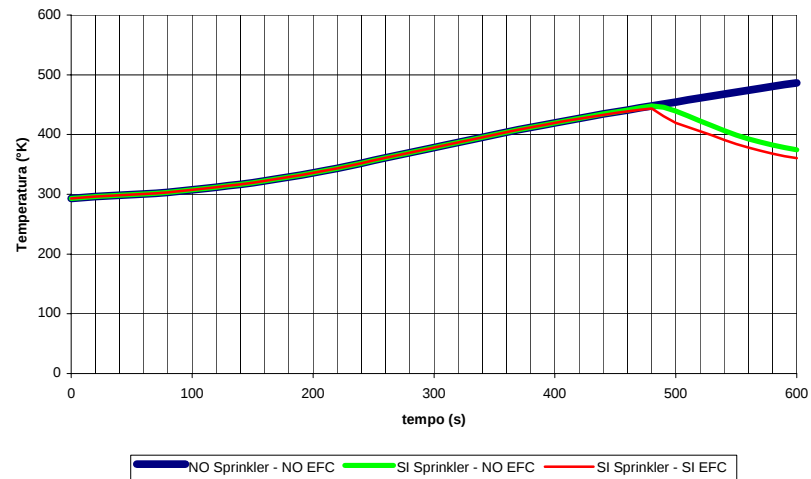


Fig. 5. Andamento temperatura strato superiore in compartimento 1

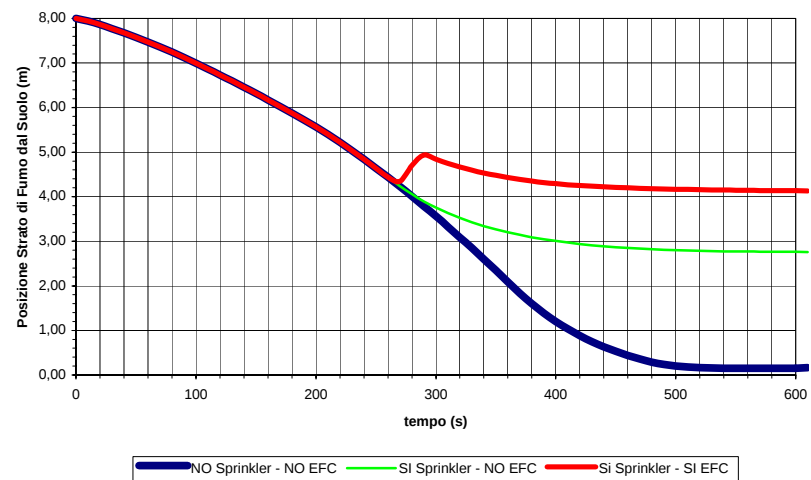


Fig. 6. Altezza dal suolo dello strato di fumo in compartimento 3

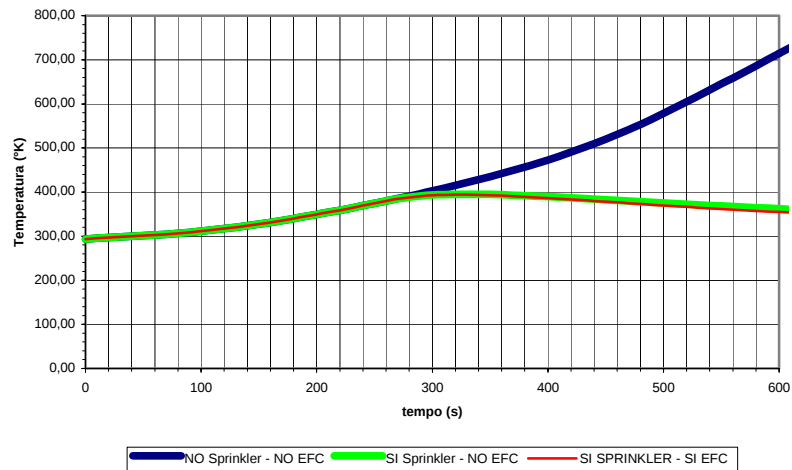


Fig. 7. Andamento temperatura strato superiore in comparto 3

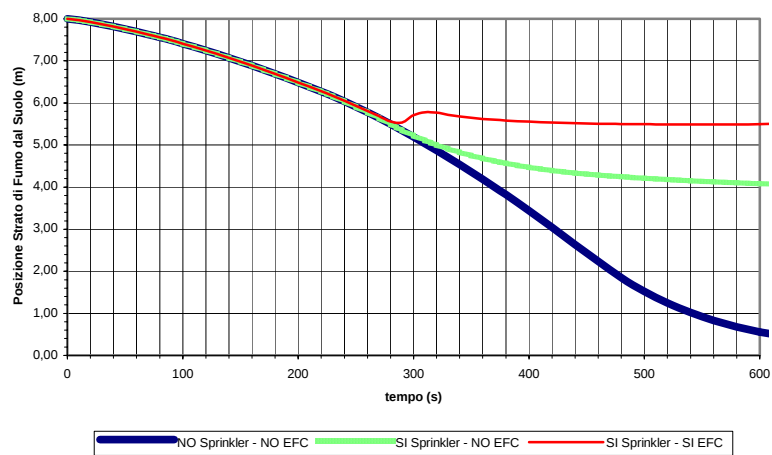


Fig. 8. Altezza dal suolo dello strato di fumo in comparto 6

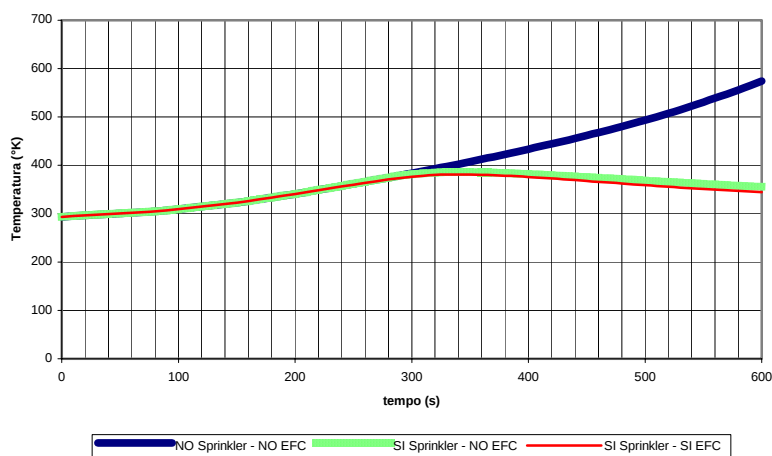


Fig. 9. Andamento temperatura strato superiore in comparto 6

9. CRITERI DI ACCETTABILITA'

Come abbiamo già detto si intende verificare:

- se in caso di incendio l'esodo avviene in condizioni di sicurezza.
- se in caso d'incendio l'intervento degli sprinkler e dei sistemi di smaltimento fumi sono in grado di limitare l'incendio ed impedire che le strutture del fabbricato siano danneggiate.

9.1 Esodo

In merito all'esodo, secondo la normativa italiana l'esodo è valutato utilizzando i seguenti parametri: numero persone da evacuare N , numero moduli m , lunghezza percorsi L , lunghezza massima ammessa percorsi L_{max} , capacità di deflusso C .

Le verifiche da effettuare sono:

$$N < m \cdot C \quad (2)$$

$$L < L_{max} \quad (3)$$

Delle due verifiche, la prima, relativa alla larghezza delle uscite in relazione al numero dei presenti, è verificata poiché il numero di addetti presente è ridotto rispetto al numero di uscite, come spesso avviene per gli stabilimenti industriali.

La seconda verifica è invece quella di maggiore interesse. Infatti la normativa italiana parla sempre di lunghezze massime ammesse dei percorsi di esodo, mentre quello che occorre in una simulazione d'incendio è il tempo ritenuto sufficiente per l'esodo.

Questo parametro discende a sua volta dalla velocità stimata delle persone durante l'esodo. Per tali valori, come già detto, in Italia non vi sono riferimenti normativi, e pertanto è necessario affidarsi a valori reperiti nella letteratura scientifica.

Si sono assunti come riferimento le seguenti velocità d'esodo, intese per una situazione di scarso affollamento come quello in esame:

$$V_{esodo\ pubblico} = 0,5 \text{ m/sec}$$

$$V_{esodo\ normodotato} = 2 \text{ m/sec}$$

La prima delle due velocità è quella assumibile per persone con difficoltà motorie, come anziani, bambini, ecc, ossia la velocità prudenziale assumibile per del "pubblico di vario genere". La seconda velocità è invece quella normale di una persona normodotata, come potrebbe essere quella di un lavoratore di una azienda industriale. A fini prudenziali si è tuttavia utilizzata la prima velocità, quella pari a 0,5 m/sec.

La fase successiva è definire i seguenti parametri:

$t_{max\ esodo\ sicuro}$ tempo determinato mediante il programma di simulazione dall'inizio dell'incendio fino al momento in cui le condizioni ambientali non garantiscono più condizioni di esodo in sicurezza

In questa simulazione si è considerato sicuro l'esodo quando lo strato di fumo nei locali interessati non scende al di sotto di 3,5 m dal suolo. Si fa presente che tale parametro è prudenziale se paragonato con altri presenti in letteratura dove si considera sicuro l'esodo finché lo strato di fumo non scende al di sotto di 2 m dal suolo.

t_{esodo} è il tempo necessario per percorrere la/le vie di esodo da parte delle persone che si muovono con la velocità di esodo precedentemente prefissata.

Nel caso in esame $t_{max\ esodo\ sicuro}$ sono i valori ottenuti con la tabella n. 5. Il caso più oneroso, ossia il caso in cui più breve è l'abbassamento a 3,5 m dello strato dei fumi, è il caso di incendio nel comparto 7, senza intervento di impianto sprinkler e senza attivazione di evacuatori di fumo. In tal caso si ha $t_{max\ esodo\ sicuro} = 260$ secondi.

Per t_{esodo} si deve determinare per ogni compartimento la via di esodo più lunga e quindi utilizzare la velocità di esodo prima stabilita con la semplice formula:

$$t_{esodo} = L / V \quad (4)$$

dove L è il percorso di esodo e V la velocità di esodo. C'è da aggiungere che tale formula è di semplice uso, ma trascura fenomeni complessi, come l'efficienza e le modalità dell'allarme antincendio, il riconoscimento del pericolo, i comportamenti delle persone. In particolare non viene inserito il ritardo che intercorre tra l'allarme e l'inizio dell'evacuazione che molti studi hanno rilevato in casi di evacuazione di edifici civili. L'insediamento industriale considerato ha presenti al suo interno solo dipendenti, e pertanto l'assunzione di "ritardo" pari a zero è accettabile, in prima fase di studio, purché sia previsto un coefficiente di sicurezza ed il piano di evacuazione sia verificato essere efficiente.

Per semplicità si assume il percorso massimo (non si fanno differenziazioni con i percorsi più brevi) e con esso si calcola un unico t_{esodo} , da prendere per tutte le simulazioni.

Nel caso in esame

$L = 60 \text{ m}$ (tale è il percorso massimo delle vie di esodo)

$V = 0,5 \text{ m/sec}$ (come stabilito in precedenza)

$t_{esodo} = L / V = 60 / 0,5 = 100 \text{ secondi}$

Pertanto t_{esodo} assunto nel seguito dello studio è pari a 100 secondi.

L'ultimo passaggio è quello di confrontare i valori di t_{esodo} e $t_{max\ esodo\ sicuro}$, introducendo un fattore di sicurezza che in letteratura è frequentemente posto pari a 2. Tale fattore intende anche assorbire le incertezze prima enumerate relative all'esodo. Pertanto si deve verificare la seguente formula:

$$t_{max\ esodo\ sicuro} / t_{esodo} > 2 \quad (5)$$

Nel caso specifico: $240 / 100 > 2$. Pertanto risulta verificato che l'esodo avviene in sicurezza, in tutti i casi considerati.

9.2 Resistenza al fuoco

In merito alla resistenza al fuoco si tralascia in questa sede la completa trattazione analitica degli effetti termici sulla struttura metallica. I riferimenti a cui si sono attinte le relazioni tra temperatura e caratteristiche meccaniche delle strutture in acciaio sono la Norma UNI 9503: Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi in acciaio [4] e il Manuale CNR: Istruzioni per la progettazione di costruzioni resistenti al fuoco [5].

In prima battuta si può utilizzare come parametro più semplice la temperatura critica presente nella pubblicazione CNR [5] dove nel caso di struttura in acciaio il valore di temperatura più basso al di sotto del quale non occorrono verifiche è pari a 350 °C.

Pertanto si può concludere che nello stabilimento in esame, ovviamente nel caso di intervento corretto degli impianti sprinkler, le strutture non subiscono danni gravi.

In seconda battuta si può utilizzare l'equazione della norma UNI 9503 [4] che mette in relazione il limite elastico dell'acciaio ad alta temperatura con quello a temperatura ordinaria.

$$f_{yT} / f_y = 1 + T / [767 \cdot \ln(T/1750)] \quad (6)$$

dove: f_{yT} è il limite convenzionale di snervamento dell'acciaio ad alta temperatura, f_y è la tensione di snervamento a temperatura ordinaria, T è la temperatura. Per $T = 210^\circ \text{ C}$ si ottiene $f_{yT} / f_y = 0,87$. Tale valore dovrebbe rientrare nei margini di sicurezza previsti per la capacità portante.

Ma le curve temperatura/tempo ricavate dal modello nei vari casi d'incendio permettono di effettuare analisi più approfondite e complesse, in questo lavoro non realizzate, in cui inserire aspetti finora non esaminati:

- le caratteristiche strutturali, i carichi presenti, etc
- l'intervento del sistema di raffreddamento ad acqua delle strutture metalliche, appositamente studiato per proteggere dal calore gli elementi metallici in caso d'incendio

Vi è infine da aggiungere che si è finora trascurato, come inevitabile in ogni modello d'incendio a zone, che la temperatura varia localmente, e non è uniforme nei due strati come ipotizzato nel fire model.

10. CONTROLLI DI VEROSIMIGLIANZA

I controlli di verosimiglianza consistono nel verificare con controlli incrociati la validità delle simulazioni effettuate. Un primo controllo consiste nel verificare, in modo indipendente dal modello CFAST, quando si giunge al flashover, e quindi confrontare tali dati con quelli ottenuti dal fire model. Si è utilizzata la Correlazione di Thomas sul flashover [6]. E' una correlazione che stima l'Heat Release Rate che produce il flashover in un compartimento. L'HRR viene determinato unicamente con riferimento alle caratteristiche geometriche del compartimento e alle superfici di ventilazione presenti.

$$HRR_{flashover} = f(\text{superfici comparto, superfici e posizioni aperture di ventilazione}) \quad (8)$$

Al fine di semplificare il calcolo ed ottenere valori prudenziali si è ipotizzato che vi fossero aperture minime

di ventilazione, in tal modo ottenendo valori di $HRR_{flashover}$ più bassi dell'effettivo. Si è poi calcolato il tempo per giungere al valore calcolato di $HRR_{flashover}$ mediante la curva ultrarapida di incendio. Il tempo così determinato è un tempo minimo al di sotto del quale non avviene il flashover. Se considero una ventilazione più estesa l'HRR sale, e quindi il tempo necessario per arrivare al flashover aumenta.

compartimento	$HRR_{flashover}$ (MW)	Tempo per giungere a flashover con curva ultrarapida (min)
1	130	13,9
2	150	14,9
3	51	8,7
4	36	7,3
5	130	13,9
6	78	10,8
7	46	8,3

Tab. 8. Correlazione di Thomas sul flashover

Si rileva che il tempo di raggiungimento del flashover è più lungo del tempo necessario per l'esodo in sicurezza, non considerando l'intervento dell'impianto sprinkler e degli evacuatori di fumo e calore, e del tempo necessario per l'intervento di sprinkler ed EFC. I valori ottenuti sono pertanto compatibili con quanto determinato in precedenza.

11. CONCLUSIONI

Si ritiene di aver dato una prima risposta alle domande poste all'inizio:

- verificare le condizioni di esodo delle persone all'interno del fabbricato quando scoppia l'incendio
- verificare le condizioni della stabilità delle strutture portanti in relazione all'andamento dell'incendio

Infatti abbiamo verificato che:

- in tutti i casi vi è esodo in condizioni di sicurezza
- grazie all'intervento dell'impianto sprinkler le strutture portanti del fabbricato non vengono danneggiate in modo tale da comprometterne la stabilità. L'incendio viene contenuto e ridotto nel tempo grazie all'azione dell'impianto sprinkler, favorendo un ulteriore intervento di estinzione da parte delle squadre di soccorso.

Ovviamente sono state utilizzate diverse semplificazioni, come già illustrato, relativamente a geometria dei comparti, curva di incendio, origine dell'incendio, condizioni di ventilazione, matrice delle simulazioni, risposta comportamentale delle persone all'allarme incendio, assenza di variazioni locali della temperatura, non intervento delle barriere a lama d'acqua, etc.

Un ulteriore approfondimento dello studio per giungere a risultati più accurati comporta un nuovo processo di analisi, con le sue varie fasi, in cui siano considerati anche gli aspetti in precedenza trascurati e in cui si eseguano delle modifiche alle misure di protezione previste.

12. BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Custer, B. Meacham, *Introduction to Performance-Based Fire Safety*, Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association, 1997
- [2] ISO/TR 13387, Technical Report "Fire Safety Engineering", 1999
- [3] National Institute of Standards and Technology, *A user's guide for FAST: engineering tools for estimating fire growth and smoke transport*, 1999
- [4] Norma UNI 9503: *Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi in acciaio*, 1989
- [5] Manuale CNR n. 192: *Istruzioni per la progettazione di costruzioni resistenti al fuoco*, 1999
- [6] Thomas P. H., *Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms*, Fire and Materials, 1981