

Università degli studi di Napoli Federico II

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base



Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali  
e della Produzione Industriale

XXXIII Ciclo del Dottorato di Ingegneria dei  
Prodotti e dei Processi Industriali

## **Analisi e Simulazione dell'Impatto di Incendi**

**Coordinatore:**

Prof. Ing Andrea D'ANNA

**Candidato:**

Ing. Assunta Cammardella

**Tutor:**

Prof. Ing Andrea D'ANNA



# Indice

Introduzione.....	5
-------------------	---

## Capitolo 1

1.1 Il rischio incendio e la sua valutazione.....	8
1.2 Il fenomeno della combustione.....	10
1.3 La dinamica dell'incendio.....	13
1.4 Scenario d'incendio.....	18
1.5 Tasso di calore rilasciato.....	21
1.6 Descrizione di un incendio al chiuso.....	28

## Capitolo 2

2.1 Rischio di un incidente rilevante.....	37
2.2 Analisi e valutazione dei rischi di incidente Rilevante.....	39
2.3 Adempimenti principali.....	41
2.4 Principali effetti dell'incendio.....	42
2.5 Prevenzione incendi.....	43

## Capitolo 3

3.1 La fluidodinamica computazionale.....	48
3.2 Le fasi della simulazione fluidodinamica.....	50
3.3 Simulazione della formazione di inquinanti.....	52
3.4 CFD nella sicurezza.....	58
3.5 Il modello CFD utilizzato: AIR.....	59

## Capitolo 4

4.1 Simulazione d'incendio nel Tunnel di Runehamar.....	61
4.2 Simulazione d'incendio nel Tunnel di Como.....	78
4.3 Simulazione d'incendio di una biblioteca.....	84

## Capitolo 5

Conclusione.....	90
------------------	----

Bibliografia.....	93
-------------------	----

## Introduzione

Lo studio della fenomenologia di un incendio riveste interesse di carattere scientifico e pratico allo stesso tempo.

La progettazione di sistemi di sicurezza adeguati deve essere basata sulla solida conoscenza della fisica degli incendi in ambienti confinati, quali le gallerie, che deriva da considerazioni teoriche, da esperimenti su grande scala effettuati in condizioni controllate e dall'analisi di incendi reali. Il pericolo principale per gli utenti in galleria, così come in tutti gli spazi limitati, è il fumo, che in breve tempo può ridurre la visibilità e rendere la fuga impossibile. Quindi per avere un controllo efficace dell'incendio bisogna avere una buona conoscenza della gestione dei fumi, che può essere realizzata basandosi su una solida comprensione dello sviluppo e della propagazione del fumo stesso.

La velocità di propagazione del fumo è determinata dagli effetti aero-termici dovuti alle caratteristiche del luogo chiuso e dal riscaldamento dell'aria interna che induce un flusso d'aria verso l'imbocco della struttura a causa dell' "effetto camino". In generale, la velocità di propagazione del fumo è molto superiore rispetto alla velocità media dell'aria, soprattutto nei tunnel, a causa della stratificazione termica. Questa differenza di velocità è fondamentale per qualunque studio nel campo della sicurezza e la mancata considerazione del fenomeno della stratificazione termica può portare ad una valutazione drammatica dei pericoli dell'incendio.

Temi cruciali relativi alla propagazione del fumo sono la velocità critica e la stratificazione del fumo stesso. Con il primo termine si intende la più piccola velocità longitudinale sufficiente per impedire interamente la propagazione di fumo contro il senso di ventilazione. La stratificazione è invece la manifestazione della tendenza dei gas caldi a spostarsi al di sopra dei gas più freddi. Tale concetto

è fondamentale per la sicurezza dell'utente in caso di incendi, in quanto il fumo caldo inizialmente è concentrato nella parte superiore e le condizioni di visibilità nella parte più bassa possono essere ottimali per la fuga.

L'obiettivo primario che l'attività ingegneristica deve porsi in tale settore è ovviamente quello di impedire il verificarsi di eventi che mettano a rischio la vita umana, l'ambiente o le strutture mentre come obiettivo secondario ha l'attenuazione delle conseguenze.

Nel passato la sicurezza in ambienti confinati era una tematica estremamente specialistica che riguardava soltanto un numero limitato di esperti. Poiché l'interesse dell'opinione pubblica non era notevole erano molto rari gli stanziamenti per la sicurezza. La situazione è cambiata negli ultimi anni in seguito a numerosi incidenti che si sono verificati.

Un'attenta analisi delle problematiche in esame ed un'attenta valutazione in caso di progettazione può aiutare nella previsione del rischio, nel supporto della gestione della e della manutenzione allo scopo di incrementare la sicurezza e l'efficienza.

Ci siamo soffermati soprattutto sulla tematica relativa alla generazione di eventi accidentali, focalizzandoci su incendi ed esplosioni, in ambienti confinati. Sono stati effettuati approfondimenti sulle tematiche oggetto della tesi con l'obiettivo di avere una conoscenza sempre più dettagliata e realistica dell'evoluzione temporale di un determinato evento fisico. Sono state analizzate metodologie di analisi più o meno sofisticate che si basano su modelli di simulazione e tecniche risolutive avanzate insieme alla conoscenza di un elevato numero di parametri fisici necessari per la descrizione del problema.

Lo studio e l'approfondimento di questi aspetti e la loro corretta e coerente applicazione può portare a significativi passi in avanti nella progettazione strutturale antincendio. Gli eventi negativi avvenuti e le loro conseguenze sono elemento di studio fondamentale per la prevenzione e la gestione della sicurezza in eventi futuri, oggetto di studio della Fire Safety Engineering.

Il primo passo da compiere per una corretta simulazione è la definizione dello scenario d'incendio. Gli scenari ipotizzati vanno intesi come approssimazione della realtà prevedibile od osservata dove il grado di approssimazione viene assunto come un senso probabilistico determinato anche dalla varietà dei fattori in gioco. Da questo si capisce non solo l'importanza ma anche la delicatezza della definizione dello scenario.

Sono stati approfonditi casi studio attraverso la modellazione CDF è stato. Tale modellazione svolge un ruolo importante in quanto, data la pericolosità degli eventi incidentali, è possibile simulare ambienti ad alto rischio per persone ed oggetti in modo virtuale, per poi attuare strategie che limitano il più possibile i danni e rendere così più efficienti le prevenzioni. I principali pregi della CFD consistono nella sua estrema flessibilità e nella capacità di trattare geometrie anche estremamente complesse, con la possibilità di descriverle in minuzioso dettaglio, tramite la costruzione di griglie flessibili molto particolareggiate, e di imporre una tipologia di condizioni al contorno molto diversificate. I dati sono stati analizzati studiandone sia l'evoluzione temporale sia la distribuzione spaziale, anche in relazione ai tempi con cui si raggiungono le condizioni di pericolo determinate dallo stress termico sull'uomo

Infine, è stata eseguita un'analisi dei casi studio ed un successivo processo di controllo dei rischi attraverso una valutazione quantitativa del rischio stesso per ottenere un miglioramento continuo della sicurezza.

L'attività di simulazione degli effetti di un evento ha un posto centrale nel processo di valutazione della sicurezza

# Capitolo 1

## *Il Rischio Incendio e la sua Valutazione*

Il rischio di incendio rappresenta uno dei maggiori rischi per qualsiasi ambiente ed in particolar modo per i luoghi di lavoro. Date le sue caratteristiche, la gestione dell'incendio è vista come un'emergenza, il suo sviluppo inizialmente subdolo e la sua rapida estensione, possono ridurre i tempi di evacuazione e di soccorso delle persone coinvolte.

La valutazione dei rischi associata ad operazioni in impianti che trattano sostanze pericolose rappresenta un'attività di estrema importanza per il raggiungimento di un elevato livello di sicurezza. Per far ciò diventa fondamentale avere conoscenza sempre più dettagliata e abbastanza realistica dell'evoluzione temporale di un determinato evento fisico, in modo da utilizzare metodologie di analisi più o meno sofisticate che si basano su modelli di simulazione e tecniche risolutive avanzate insieme alla conoscenza di un elevato numero di parametri fisici necessari per la descrizione del problema.

Negli ultimi anni si è assistito a enormi progressi nella simulazione numerica di sistemi reattivi turbolenti. Ciò è stato reso possibile dai progressi conseguiti in diversi settori tra cui: la modellazione della fisica dei sistemi; lo sviluppo di algoritmi numerici sempre più robusti ed efficienti; l'aumento della potenza di calcolo disponibile; l'introduzione di schemi cinetici sempre più dettagliati. L'utilizzo di tali metodologie è stato determinato anche dalla possibilità di poter riprodurre sistemi anche molto complessi con dispendio minore di tempo e denaro, oltre alla possibilità di simulare fenomeni intrinsecamente pericolosi altrimenti difficilmente riproducibili in condizioni di sicurezza.

Negli ultimi anni sono stati vari gli eventi catastrofici riguardanti incendi in ambienti confinati che hanno evidenziato la necessità di miglioramenti dei sistemi di sicurezza previsti e quindi di più approfondito studio del fenomeno.

Nella letteratura scientifica si possono trovare numerosi lavori che riguardano l'analisi teorica della termofluidodinamica di un incendio all'interno di un ambiente confinato. Al contrario, vi è un numero molto minore di lavori sperimentali, e ciò a causa delle difficoltà che si incontrano nel ricreare idoneamente le condizioni reali. Spesso le prove di incendio sui materiali vengono effettuate in camere di combustione e particolari forni, in cui vengono eliminati molti degli effetti perturbativi che si possono verificare in condizioni reali. L'eliminazione delle perturbazioni è utile per definire condizioni di riferimento per la comparazione dei dati sperimentali, quando, però, si vuole studiare l'evoluzione di un evento di incendio, sono proprio le perturbazioni al contorno uno degli elementi più importanti da dover considerare. In questo caso, allora, è importante ricreare quanto più è possibile le reali condizioni in cui si sviluppa l'incendio, effettuando la sperimentazione in ambienti per lo più simili a quelli reali. Si possono facilmente comprendere le notevoli difficoltà che si incontrano nell'effettuare una sperimentazione di questo tipo, sia a livello di organizzazione sia per gli elevati costi economici che è necessario sostenere.

## *1.2 Il fenomeno della combustione*

La combustione è alla base della determinazione di un incendio ed ha la caratteristica di svilupparsi in modo incontrollato ed imprevedibile. La combustione è una reazione chimica esotermica tra un combustibile ed un comburente, caratterizzata dallo sviluppo di energia sotto forma di luce, calore, fumi e gas. Per far sì che tale processo si verifichi è necessaria la presenza di tre elementi: il combustibile, il comburente e la sorgente di calore, quest'ultima creerà l'innesco.

Il combustibile è una sostanza caratterizzata da un potenziale termico in grado di sostenere il processo di combustione, può presentarsi allo stato solido, liquido o gassoso. Il comburente è la sostanza che unendosi al combustibile attiva la combustione, quello maggiormente presente in natura è l'ossigeno. La sorgente di calore, che determina l'innesco, ha una temperatura superiore a quella di accensione che, a contatto con la miscela infiammabile, avvia la combustione. Questi tre elementi sono necessari per la realizzazione della combustione infatti l'assenza di uno dei tre così come una loro quantità insufficiente, non fa avvenire il fenomeno.

Da questa definizione possiamo effettuare un'importante considerazione sui sistemi di spegnimento degli incendi, infatti essi si basano su tre principi:

- esaurimento del combustibile: allontanamento o separazione della sostanza combustibile dal focolaio d'incendio;
- soffocamento: separazione del comburente dal combustibile o riduzione della concentrazione del comburente in aria;
- raffreddamento: sottrazione di calore fino ad ottenere una temperatura inferiore a quella necessaria al mantenimento della combustione.

La combustione è caratterizzata da diversi parametri chimici e fisici, i principali sono:

- la temperatura di accensione ovvero la minima temperatura alla quale la miscela combustibile-comburente inizia a bruciare spontaneamente in modo continuo senza ulteriore apporto di energia;

<b>Combustibile</b>	<b>Temperatura di accensione (°C)</b>
Benzina	250
Gasolio	220
Idrogeno	560
Acetone	540
Metano	537

Tabella 1: Temperatura di accensione di alcuni combustibili

- la temperatura teorica di combustione che rappresenta il massimo valore di temperatura raggiunto nella combustione completa di una sostanza, che viene ossidata con la minima quantità di aria teorica e in condizioni ideali;
- l'aria teorica di combustione è la quantità di aria necessaria per raggiungere la combustione completa del materiale combustibile;

<b>Combustibile</b>	<b>Temperatura teorica di combustione (°C)</b>
Idrogeno	2205
Metano	2050
Petrolio	1800
Propano	2230

Tabella 2: Temperatura teoriche di combustione di alcune sostanze

- il potere calorifico è la quantità di calore sviluppata dalla combustione completa dell'unità di massa di una sostanza solida o liquida, o dall'unità di volume di una sostanza gassosa. Il potere calorifico si distingue in

inferiore e superiore, la differenza sta nel considerare o meno il calore latente di vaporizzazione;

<b>Combustibile</b>	<b>Potere calorifico inferiore (MJ/kg)</b>	<b>Aria teorica di combustione (m<sup>3</sup>/kg)</b>
Legno	17	5
Carbone	30-34	8
Benzina	42	12
Alcool etilico	25	7,5
Propano	46	13
Idrogeno	120	28,5

Tabella 3: Temperatura teoriche di combustione di alcune sostanze

- la temperatura di infiammabilità che rappresenta la più bassa alla quale un liquido infiammabile emette vapori in quantità tale che miscelati con l'aria possono incendiarsi in presenza di una fonte di innesco. I limiti di infiammabilità, superiore e inferiore, sono determinati dalla concentrazione minima e massima di vapori di un liquido infiammabile miscelato con l'aria alle quali la combustione, una volta innescata, si propaga a tutta la massa. Il range di concentrazione combustibile/comburente rappresenta il campo di infiammabilità.

<b>Combustibile</b>	<b>Temperatura di infiammabilità (°C)</b>	<b>Campo di infiammabilità (C%)</b>	
		<b>Limite inferiore</b>	<b>Limite superiore</b>
Gasolio	65	0,6	6,5
Acetone	-18	2,5	13
Benzina	-20	1	6,5
Metano	-180	5	15

Tabella 4: Temperatura e campo di infiammabilità di alcune sostanze

I carburanti sono sostanze chimiche combustibili caratterizzate da elevato contenuto energetico. La variazione della temperatura di un carburante, in presenza di un comburente, può determinare il rilascio rapido dell'energia. La temperatura più bassa alla quale può formarsi una miscela infiammabile con l'aria è definita flash-point, alcuni liquidi, che hanno flash-point al di sotto della temperatura ambiente, sviluppano automaticamente vapori in quantità sufficiente da formare una miscela esplosiva, pertanto, perdite di questi liquidi sono da considerarsi estremamente pericolose.

### *1.3 La Dinamica dell'Incendio*

Lo sviluppo di un incendio all'interno di un ambiente può essere illustrato con riferimento all'andamento temporale della temperatura media durante l'incendio (fig. 1). Tale curva permette di individuare più stadi specifici durante lo sviluppo dell'incendio: l'ignizione, lo sviluppo preflashover, il flashover, l'incendio completamente sviluppato e il decadimento finale.

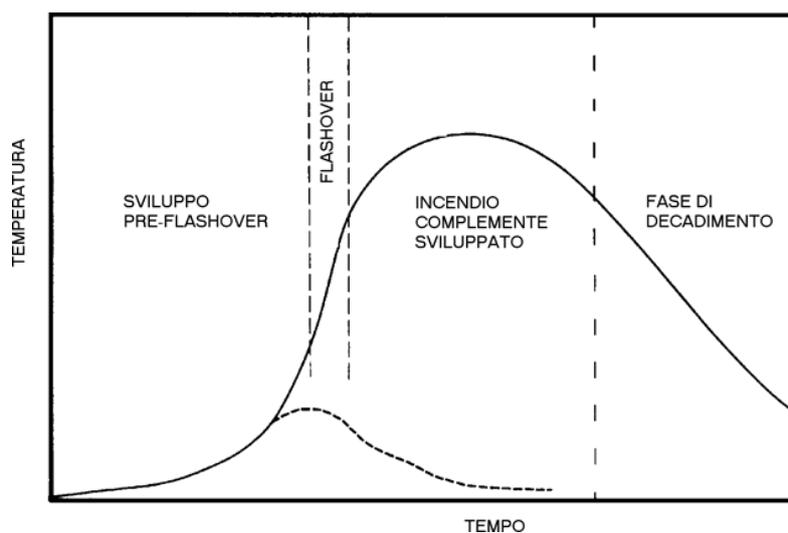


Fig. 1 – Fasi di sviluppo di un incendio (a tratteggio in assenza di flashover)

Tutti gli incendi iniziano con un evento di innesco, l'ignizione: una sorgente di calore entra in contatto con un combustibile, generalmente liquido o solido, determinando un processo di pirolisi che libera vapori infiammabili capaci di reagire con ossigeno esotermicamente, sviluppando fiamme e gas combustibili.

L'ignizione può essere *pilotata* o *spontanea*. Nel primo caso la combustione si avvia per mezzo di un elemento "pilota" esterno, come una fiamma indipendente, una scintilla elettrica o un punto caldo. Nel secondo caso, invece, la combustione si avvia spontaneamente per effetto dello stato in cui si viene a trovare la miscela dei vapori infiammabili con l'ossigeno. Le cause più frequenti d'innesco della combustione sono di origine termica o di origine elettrica (cortocircuiti, scariche elettriche e atmosferiche, ecc.).

Una volta che si sia innescata una combustione localizzata, può verificarsi una delle seguenti possibilità:

- se il materiale combustibile incendiato è limitato ed isolato, esso brucia senza coinvolgere altre superfici combustibili;
- se la ventilazione è limitata, l'incendio può estinguersi o continuare a bruciare molto lentamente in base alla disponibilità di ossigeno (incendio controllato dalla ventilazione);
- se il materiale combustibile è sufficiente e così anche la ventilazione, l'incendio può svilupparsi coinvolgendo altri materiali combustibili presenti nell'ambiente.

Lo sviluppo dell'incendio, con l'allargamento delle fiamme fino a coinvolgere altri materiali combustibili, richiede che su questi giunga la potenza termica necessaria per il processo di volatilizzazione che dà luogo alla formazione di vapori infiammabili. Tale potenza termica deriva dall'irraggiamento proveniente dalle fiamme esistenti, dai fumi che si addensano in prossimità del soffitto e dal soffitto stesso, la cui temperatura sale abbastanza rapidamente in un incendio.

Nel caso in cui la combustione riesce a svilupparsi, si determinano le condizioni del *flashover*. Se, invece, la combustione non riesce a svilupparsi a causa di una limitata ventilazione, può accadere che i vapori prodotti dal processo di pirolisi si accumulino nello spazio, con il pericolo che a seguito di un improvviso aumento della ventilazione, ad esempio per l'apertura di una porta, si determini una loro improvvisa combustione (*backdraught*).

Il flashover (flames flash over) segna la transizione da un incendio localizzato ad un incendio generalizzato, in cui tutte le superfici combustibili bruciano contemporaneamente. Durante la fase di sviluppo dell'incendio si ha l'estensione delle superfici combustibili soggette al processo di pirolisi, che determina l'accumularsi di vapori infiammabili. In presenza di sufficiente ossigeno, quando i vapori raggiungono una temperatura sufficientemente elevata, essi si incendiano contemporaneamente dando luogo a quello che si chiama flashover. Ciò determina un rapido aumento della potenza termica rilasciata che continua ad alimentare sempre più il processo, per cui, in presenza di un elevato carico di incendio, il processo non potrà che essere limitato dal solo grado di ventilazione presente. Pertanto, dopo il flashover, gli incendi finiscono generalmente per essere controllati dalla ventilazione a causa dell'elevata richiesta di ossigeno necessaria per mantenere l'incendio generalizzato.

Una precisa definizione del momento in cui si verifica il flashover non è strettamente possibile. Tuttavia, studi sperimentali dovuti a Waterman indicano che esso si verifica quando il flusso radiativo al livello del pavimento, proveniente dal soffitto e dalle altre superfici irraggianti, raggiunge il valore di  $20 \text{ kW/m}^2$ . Altri studi (Hägglund, Fang) indicano il verificarsi del flashover quando la temperatura del soffitto raggiunge circa  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  (in un ambiente di 2.70 m circa di altezza).

Successivamente al flashover o anche al backdraught, l'incendio risulta essere completamente sviluppato. La potenza termica sviluppata raggiunge il picco e la

temperatura dei fumi può superare facilmente i 1000 °C. L'incendio può estendersi ad altre parti dell'edificio e indurre danni strutturali. Anche se l'incendio rimane confinato, i fumi e i gas tossici, caratterizzati da un flusso molto turbolento, possono diffondersi lontano dalla sorgente originale determinando condizioni di estremo pericolo.

Come ultima fase abbiamo il decadimento. In questo stadio finale la temperatura inizia a diminuire poiché il combustibile si va esaurendo. Le fiamme si estinguono e finiscono per rimanere solo braci incandescenti. Spesso l'inizio di questo stadio viene identificato con l'istante in cui la temperatura media nell'ambiente si è ridotta all'80% del valore di picco. La storia temporale della temperatura media all'interno del compartimento è molto importante per valutare la severità dell'incendio in termini di danni indotti dallo stress termico sia sull'uomo sia sulle strutture. In generale, i danni alle persone dovuti al calore si verificano già nella fase preflashover, mentre i danni alle strutture si verificano essenzialmente dopo il flashover, quando la temperatura può superare facilmente i 1000°C.

Lo studio della fenomenologia di un incendio riveste interesse di carattere scientifico e pratico allo stesso tempo. Tra i modelli proposti per interpretare la dinamica di un incendio, quelli relativi ai cosiddetti *incendi reali* hanno avuto negli ultimi anni un notevole sviluppo. L'applicazione *critica* dei modelli di simulazione di incendi reali che si sviluppano all'interno di un edificio, civile o industriale, può diventare uno strumento utile per la valutazione di taluni parametri di riferimento legati alle condizioni di vivibilità degli ambienti ed alla risposta dell'edificio alle azioni termiche cui è assoggettato.

Questi modelli di simulazione di incendi reali si diversificano dai modelli più classici o semplificati di *incendio convenzionale* per la possibilità di descrivere, in misura più o meno approssimata, le fasi dell'incendio (iniziale, intermedia, finale) tenendo in conto lo *scenario* in cui l'incendio stesso si manifesta. I modelli

relativi agli *incendi reali* ai quali è stato dedicato uno studio critico e comparativo rientrano nella categoria dei cosiddetti *modelli a zone*, caratterizzati da opportuni volumi di controllo la dinamica dei quali sintetizza l'evoluzione dell'incendio, a patto di descrivere le condizioni di sviluppo ragionevolmente prevedibili (studio di *previsione*) od osservate (studio di *verifica*). Per completezza occorre tener presente che ad un livello di complessità maggiore, sia per la descrizione necessaria che per i risultati ottenibili, sono disponibili o in fase di perfezionamento i cosiddetti modelli di *fluidodinamica computazionale (CFD)*, che comunque richiedono una accorta interpretazione del modello da adottare. La possibilità di ricorrere a vari modelli per la simulazione di un incendio è oggi un patrimonio internazionale che comincia ad essere riconosciuto nelle varie normative tecniche. Testimonianza può esserne ad esempio la recente versione dell'Eurocodice 1 parte 2-2 "Azioni sulle strutture esposte all' incendio", nella quale si presentano in forma *per ora solo informativa* i criteri per la definizione di un incendio reale in alternativa ai differenti incendi convenzionali.

L' impiego di un modello di incendio reale (o naturale) richiede, in genere, la definizione di una procedura nella quale specificare i parametri globali di riferimento, quali: lo scenario di incendio, la configurazione del compartimento in cui si può sviluppare l'incendio, il carico di incendio ed il tasso di calore rilasciato (curva RHR). Questi parametri globali sono, in particolare, fondamentali per la simulazione di un incendio tramite i modelli a zone.

## 1.4 Scenario dell'Incendio

Il primo importante passo da compiere per una corretta simulazione è la definizione dello scenario di incendio. Si badi che, in ogni caso, lo scenario o gli scenari ipotizzati vanno intesi come approssimazioni alla realtà prevedibile od osservata, assumendo il grado di approssimazione un senso probabilistico vista la varietà dei fattori in gioco. Da questo si capisce non solo l'importanza, ma anche la delicatezza della definizione di scenario. Fortunatamente cominciano oggigiorno ad essere diffuse e disponibili informazioni su scenari di incendio effettivamente osservati nella realtà, oppure su scenari progettualmente impiegati in situazioni particolari, anche se è auspicabile un approfondimento delle conoscenze e delle indagini su basi sperimentali comparabili.

La descrizione dello scenario di un incendio comporta la definizione di tutte (possibilmente) le condizioni che influenzano il decorso dell'evento che si vuole studiare, considerate tutte e tre le fasi paradigmatiche di evoluzione: iniziale (ignizione e sviluppo), intermedia (propagazione e mantenimento), finale (raffreddamento e spegnimento). Ponendo come principali *obiettivi* della simulazione di un incendio la *difesa delle vite umane* (condizioni di vivibilità degli ambienti) e la *salvaguardia delle costruzioni* (risposta dell'edificio alle azioni termiche).

A tal proposito si ricordino i requisiti essenziali della Direttiva Europea sui prodotti da costruzione – le principali condizioni che vanno definite nello scenario di incendio possono riassumersi in:

- il *carico di incendio*, in particolar modo la natura, la quantità e la distribuzione del materiale combustibile;

- la *geometria del compartimento* in cui si sviluppa l'incendio, incluse le caratteristiche termo-meccaniche dei materiali che costituiscono la frontiera del compartimento;
- le *caratteristiche di ventilazione* disponibile, funzione sia delle aperture presenti che della capacità di tenuta durante il tempo dell'incendio dei materiali su esse presenti;
- la *posizione dell'incendio*, sia nei riguardi dell'azione termica sulle strutture che nei riguardi della propagazione ed accumulazione dei fumi;
- le *misure di protezione attiva* presenti nel compartimento;
- le *caratteristiche di resistenza al fuoco* delle strutture portanti dell'edificio.

Un aspetto essenziale da tenere a mente è che la scelta del modello di simulazione e la definizione dello scenario dell'incendio non sono tra loro indipendenti: la scelta del modello più adatto per un dato incendio dipende infatti dallo scenario definito.

La valutazione spaziale dell'ambiente in cui si può sviluppare l'incendio viene sintetizzata nel termine *studio della configurazione*. Poiché la progettazione ingegneristica di un edificio assoggettabile ad un incendio fa riferimento ad appositi nuclei spaziali entro i quali delimitare lo sviluppo eventuale dell'incendio stesso, chiamati compartimenti (antincendio), il parametro di riferimento globale del quale occorre occuparsi nella simulazione è ovviamente la configurazione del compartimento.

Per inciso, l'aggettivo antincendio riferito al compartimento non ha la presunzione di escludere la probabilità di accadimento dell'evento incendio, ma ha il significato di indicare la presenza di opportuni accorgimenti progettuali ed operativi volti alla riduzione del rischio incendio. Lo studio della configurazione del compartimento comporta la iniziale valutazione delle caratteristiche di

ostacolo alla propagazione dell' incendio offerte dai differenti elementi che costituiscono fisicamente la frontiera di un certo spazio, quali solai, pareti, soffitti, porte, finestre ... .Tramite la valutazione delle caratteristiche di tenuta di questi elementi rispetto al tipo di incendio previsto è possibile, allora, determinare le dimensioni geometriche e le proprietà fisiche del compartimento entro il quale l' incendio può svilupparsi. A volte può accadere che non sia possibile o rappresentativo mantenere la puntuale corrispondenza tra stanza o stanze reali e compartimento in simulazione: una appropriata analisi potrà consentire l'individuazione dello spazio più adatto per rappresentare la configurazione del compartimento della simulazione.

I successivi due aspetti che vanno valutati sono legati agli scambi di energia tra il compartimento e l'ambiente circostante. Il primo è relativo alle caratteristiche termiche delle superfici di chiusura dello spazio – in genere partizioni verticali ed orizzontali – attraverso le quali si verificano gli scambi di calore. Il secondo è relativo alla definizione delle aperture disponibili – volontariamente o involontariamente – durante il decorso dell'incendio.

Quest' ultimo fattore di ventilazione deve essere analizzato nei riguardi della posizione e nei riguardi delle dimensioni, dal momento che sia il quantitativo di ossigeno che alimenta la combustione sia gli scambi di energia termica per convezione ed irraggiamento – oltre che per trasporto di massa – ne sono influenzati.

Un edificio è in via generale composto da più ambienti. La propagazione di un incendio da un ambiente a quelli adiacenti dipende essenzialmente dalle caratteristiche termo-meccaniche di resistenza, tenuta ed isolamento degli elementi di partizione rispetto alla azione termica agente. In particolare, l'incremento di temperatura sulla faccia non esposta al fuoco di un elemento divisorio deve essere limitato, al fine di evitare l'ignizione di combustibile

eventualmente presente al di là del divisorio ed al fine di mantenere l'integrità del divisorio stesso durante il corso dell'evento incendio.

Il metodo più comunemente utilizzato per valutare l'efficacia di un elemento divisorio ad impedire la propagazione dell'incendio è il riferimento ai suoi requisiti di resistenza al fuoco rispetto all' incendio ISO standard. In questi requisiti, infatti, sono incluse le peculiari caratteristiche di tenuta ed isolamento dell'elemento esposto all' incendio.

Sono auspicabili, quando possibile, prove e sperimentazioni apposite che simulino le condizioni allo studio della simulazione, ovvero test apposti su elementi di prova rappresentativi della realtà, ovvero deduzioni fatte da test eseguiti su elementi analoghi. Si otterrebbero in tal caso risultati certamente più affidabili di quelli che derivano da una analisi all' incendio ISO. Sfortunatamente, il costo delle sperimentazioni nelle applicazioni ordinarie indirizza verso il ricorso alle già note prestazioni dei diversi elementi assoggettati alla curva di incendio standard.

Vale la pena sottolineare la limitazione di un siffatto approccio, seppur comunemente usato: la valutazione di caratteristiche legate ad un incendio reale – o naturale - vengono valutate invece nell'ambito di un incendio standard e specifico. La valutazione, pertanto, deve essere verificata dall' esperienza di colui che sta modellando l'evento incendio: la verifica consiste essenzialmente in un confronto degli effetti sull' elemento considerato tra l'incendio standard e l'incendio reale.

## 1.5 *Il Tasso di Calore Rilasciato*

Nelle valutazioni di un incendio di notevole importanza è la conoscenza dei meccanismi di ventilazioni presenti. Altri elementi caratteristici sono la velocità e la durata della combustione, entrambi correlati al tasso di rilascio energetico RHR (Rate of Heat Release). L'importanza della ventilazione si estende anche alla valutazione degli scambi di energia con l'ambiente circostante, che sia l'esterno oppure un altro compartimento. Le aperture che più comunemente si incontrano in un compartimento sono: porte, finestre lungo le pareti verticali, lucernari o aperture sul soffitto. Alcuni di questi elementi sono a volte dotati di specifica resistenza al fuoco secondo una esposizione ad incendio standard.

Poiché il pieno sviluppo di un incendio può dipendere dalla quantità di aperture disponibili, è fondamentale assumere durante il decorso dell' incendio dimensioni e posizionamento delle aperture il più possibile aderenti alla realtà: qualora il modello di simulazione di incendio non consentisse la completa rispondenza con la realtà, vanno almeno garantite quelle rispondenze che investono direttamente gli scambi di massa ed energia con l' esterno ( per esempio: aree di passaggio, allineamento geometrico dei flussi,...). In assenza di assunzioni più attendibili vanno adottate ipotesi a favore di sicurezza.

Si tenga presente che ciascuna tipologia di modello di simulazione di incendio ha una propria definizione delle aperture disponibili.

Ad esempio, i modelli CFD consentono una descrizione sofisticata, i modelli a zone richiedono localizzazione e dimensione, i modelli di incendio parametrico richiedono appositi parametri semplificativi descrittivi.

L' importanza della ventilazione è confermata dagli sforzi compiuti dai ricercatori di trovare una forma generale rappresentativa, tanto è vero che per una singola apertura verticale la gran parte dei modelli adotta la forma

$$A_w * \sqrt{h}$$

essendo  $A_w$  l'area totale ed  $h$  la altezza della apertura.

Nel caso di forme rappresentative più complesse, la base di partenza è quasi sempre la stessa sopra descritta. A causa della complessità della modellazione del flusso di ventilazione durante un incendio, non tutti i modelli consentono la descrizione completa dei tipi di aperture presenti nel compartimento. Nell'ambito dei modelli a zone, per esempio, non tutti i codici di simulazione prevedono la presenza di aperture orizzontali (che sono in genere quelle su soffitto).

Sarà compito di colui che sta analizzando l'incendio con un opportuno modello, lo scegliere la descrizione più appropriata, tra quelle consentite, delle aperture del compartimento. La parte energetica associata alla evoluzione di un incendio trova immediato riscontro nel ruolo delle frontiere fisiche del compartimento antincendio, nella fattispecie partizioni verticali ed orizzontali.

Riferendosi con intento di generalità alle pareti, lo scambio energetico con l'esterno avviene secondo le modalità classiche della trasmissione del calore.

La difficoltà maggiore della modellazione risiede nella descrizione energetica delle fasi transitorie – che d'altronde sono quelle tipiche delle fasi di crescita e di esaurimento dell'incendio – anche se oggi sono disponibili descrizioni sofisticate con diverso grado di approssimazione.

Il parametro comunemente impiegato nella descrizione delle proprietà termiche delle pareti del compartimento antincendio è il *coefficiente di penetrazione del calore*, detto anche fattore  $b$ , definito come:

$$b = \sqrt{\lambda \rho c}$$

in cui

$\lambda$  rappresenta la conduttività termica [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ],

$\rho$  rappresenta la densità [ $\text{kg m}^{-3}$ ],

$c$  rappresenta la capacità termica [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ].

Mentre nel caso di parete monostrato le caratteristiche sono riferite all' unico materiale presente, nel caso di pareti multistrato costituite da spessori multipli di materiali differenti, viene calcolato un valore efficace del fattore  $b$  che tiene conto del contributo dei diversi strati mediante l'espressione:

$$b = \frac{\sqrt{\sum_i s_i \lambda_i}}{\sqrt{\sum_i \frac{s_i c_i \lambda_i}{b_i^2}}}$$

in cui:

$\lambda_i$  è la conduttività termica del materiale  $i$ -esimo, in [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ];

$s_i$  è lo spessore dello strato di materiale  $i$ -esimo, in [m];

$c_i$  è la capacità termica del materiale  $i$ -esimo, in [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ];

$b_i$  è il fattore  $b$  del materiale  $i$ -esimo, in [ $\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1/2}$ ];

$\rho_i$  è la densità del materiale  $i$ -esimo, in [ $\text{kg m}^{-3}$ ].

Il fattore  $b$  così calcolato viene utilizzato con il campo di applicazione:  $1000 < b < 2000$ . Le proprietà termiche dei materiali variano con la temperatura durante l'evolversi dell'incendio. La variazione è poco sentita per gli ordinari materiali da costruzione, mentre è significativamente più sentita per i materiali costituenti le protezioni (antincendio) degli elementi strutturali. Non sempre i modelli disponibili per la simulazione dell'incendio tengono conto di queste variazioni. In tal caso, se a favore di sicurezza per la severità dell'incendio, si possono assumere i valori delle proprietà termiche dei diversi materiali pari a quelli relativi alla temperatura ambiente. Il carico di incendio definisce il quantitativo di energia disponibile per la combustione sotto forma di materiale

presente in un dato locale. Non definisce le modalità di rilascio dell'energia. Per descrivere la dinamica di sviluppo di un incendio, del resto, sono proprio le *modalità di rilascio energetico* a giocare un ruolo fondamentale. La variazione spazio-temporale della liberazione di energia dal materiale combustibile governa gli scambi del *sistema termodinamico materiale combustibile-ambiente*, e l'andamento delle *temperature dei gas* sviluppati.

Si pensi come, infatti, uno stesso carico di incendio possa bruciare con differenti velocità a seconda delle particolari condizioni che si instaurano, dipendenti e dal materiale (quantitativo, pezzatura...) e dall'ambiente (volumetria, aperture...), dando origine a temperature nel locale coinvolto anche molto diverse da caso a caso.

Sulla base di numerosi test eseguiti in campo internazionale, l'andamento delle modalità di *rilascio energetico* - chiamato anche *tasso di calore rilasciato* oppure *Rate of Heat Release RHR* oppure *potenza termica* - viene descritto da tre fasi caratteristiche: iniziale, intermedia, finale. La descrizione delle tre fasi viene preferibilmente basata su modelli matematici semplici. Nel tratto iniziale la curva RHR cresce in genere con legge quadratica, con incremento di pendenza più o meno accentuato secondo la velocità di combustione; questa fase iniziale di RHR in funzione del tempo può comprendere oltre alla fase di ignizione e sviluppo dell'incendio, anche la fase di ignizione generalizzata (flashover) dell'incendio stesso. Il tratto intermedio della curva RHR viene assunto stazionario, nell'ipotesi che la massa bruciata di combustibile - proporzionale in vario modo al tasso di rilascio del calore - rimanga costante nel tempo. Il tratto finale della curva RHR decresce dal valore stazionario al valore nullo, secondo un andamento in genere lineare, a partire da un certo quantitativo di carico di incendio bruciato, ad esempio il 70%.

L'importanza della curva RHR risiede nel duplice fatto di descrivere la dinamica di un incendio e di costituire uno dei dati di ingresso (input) e di uscita (output)

per i modelli di simulazione a zone. Prendendo come riferimento significativo il flashover di un incendio entro un ambiente chiuso (quando ovviamente il flashover stesso si manifesta), la fase iniziale di RHR descrive le condizioni pre-flashover, le condizioni di flashover e le condizioni principalmente di transizione post-flashover; la fase intermedia di RHR descrive le condizioni post-flashover dell'incendio nel locale o compartimento. Descrizioni diverse possono essere adottate in casi particolari.

Nell'ambito degli incendi al chiuso (compartment fire, room fire) il manifestarsi del flashover sembra potersi interpretare come un punto singolare del sistema. Altro punto singolare sembra essere il meccanismo schematico di guida della dinamica dell'incendio, almeno da una certa fase in poi, rappresentato dalle alternative di *controllo incendio da combustibile* e di *controllo incendio da ventilazione*, ciascuno prevalente secondo il mutuo legame tra combustibile disponibile e ventilazione disponibile, dettando il valore minimo dei due, secondo vari criteri, il meccanismo che si instaura nell'ambito dell'incendio al chiuso.

Al variare dinamico delle condizioni, d'altro canto, sono stati osservati dei passaggi tra i due meccanismi di controllo dell'incendio, anche se la possibilità di reversibilità è tuttora in fase di studio, almeno nei riguardi di una reversibilità totale cioè su scala totale.

La modellazione matematica della fase iniziale di potenza termica di un incendio è espressa in via generale dalla relazione:

$$RHR = (t/t\alpha)^2$$

Nella quale:

- RHR è la potenza termica rilasciata nella fase iniziale di crescita dell'incendio, espressa in [MW];
- $t$  è il tempo, espresso in [s];
- $t_\alpha$  è una costante (di tempo) caratteristica, espressa in [s], che dipende dalla destinazione del compartimento ovvero dalla natura del combustibile. Questa costante esprime il tempo necessario all' incendio per raggiungere una potenza prefissata, in genere 1 MW.

L' esponente 2 ovviamente definisce il tasso di crescita RHR parabolico ordinario, anche se esponenti diversi sono stati proposti ed utilizzati in alcuni casi.

La valenza di questo approccio, caratteristico soprattutto dei Centri di Ricerca Internazionali, è primariamente quella di aumentare il livello di conoscenze disponibili, relative ad insiemi il più possibile omogenei di osservazione, in modo da investigare da un lato la particolarità di una situazione riscontrabile nella realtà (ad esempio incendio di un edificio, incendio di una stanza, incendio di una specifica categoria di materiali combustibili, incendio di varie categorie di materiali combustibili simultaneamente presenti...), e dall' altro in modo da comprendere e riscontrare quegli aspetti trasversali che si manifestano (ad esempio evoluzione termodinamica dei gas di combustione, interferenze tra i materiali, effetti di scala dell' ambiente...).

Conseguenza è lo sviluppo di appositi modelli di rappresentazione, più o meno sofisticati, ma anche l'acquisizione di curve RHR sperimentali. Esistono varie tecniche sperimentali disponibili per il riconoscimento e l'acquisizione delle curve RHR sperimentali, che vanno dalla registrazione del quantitativo di materiale che partecipa alla combustione alla misura del consumo di ossigeno. Alla attendibilità dei risultati ottenibili si accompagna, tuttavia, la delicatezza

dell'impostazione sperimentale ed il costo economico. Ad ogni modo, sono oggi disponibili in letteratura taluni database di curve RHR sperimentali riferite, per lo più, ad oggetti comunemente impiegati nelle abitazioni e nei luoghi di lavoro: dal singolo tavolo, alla scrivania con sedie, alle librerie di diverse dimensioni, e così via.

## *1.6 Descrizione di un Incendio al Chiuso*

Descriviamo ora dei modelli matematici per la descrizione di un incendio al chiuso.

La dinamica di un incendio al chiuso può convenientemente essere descritta dalle seguenti 5 fasi rappresentative:

1. la prima è la *fase di ignizione* dell'incendio, durante la quale la temperatura media dei gas non è particolarmente elevata e non compromette la capacità portante della struttura del fabbricato;
2. la seconda è la *fase di sviluppo* dell'incendio, durante la quale la temperatura associata all' incendio aumenta molto velocemente;
3. la terza è la *fase di ignizione generalizzata, o flashover*, che avviene in un intervallo di tempo molto più rapido (al limite istantaneamente) rispetto a quelli delle altre fasi. Il flashover è caratterizzato dall' ignizione di tutti i materiali combustibili presenti nel compartimento e dal passaggio da stato di incendio più o meno localizzato a stato di incendio diffuso a tutto il compartimento stesso. Sono stati proposti vari criteri matematici per l'individuazione del flashover (raggiungimento di una determinata temperatura media dei gas prodotti dall' incendio; raggiungimento di un

determinato valore di irraggiamento termico a pavimento; abbassamento oltre una certa soglia dei gas caldi...), ciascuno con pregi e difetti.

4. La fase successiva è caratterizzata da una *fase di pieno sviluppo* dell'incendio;
5. la fase finale è la *fase di raffreddamento*.

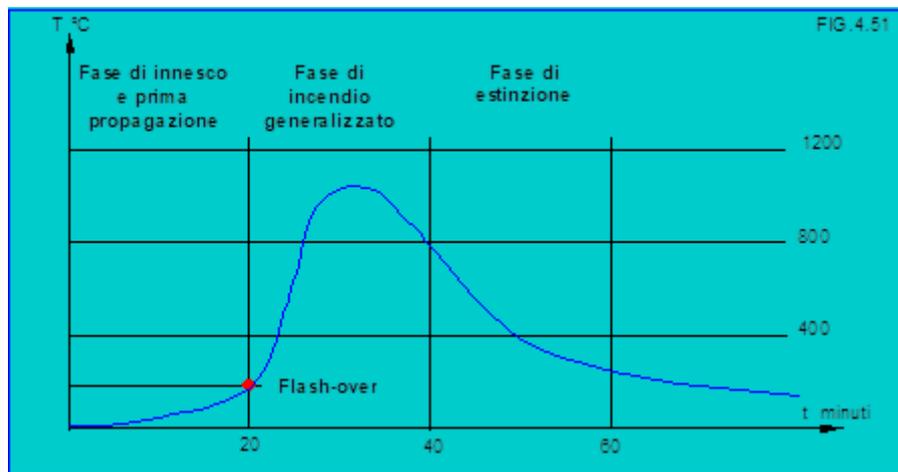


Figura 2: Andamento di un incendio in un locale chiuso

Naturalmente, non è detto che tutte le 5 fasi siano presenti: si pensi agli incendi che si autoestingono rapidamente (presenza delle sole fasi 1 e 5), oppure agli incendi che non arrivano al flashover ( fasi 1, 2, 5 ). Si tenga presente, inoltre, che le precedenti vogliono essere solo come schematizzazioni, utilizzabili insieme con altre schematizzazioni parimenti utili. Ad esempio, nell'ambito della suddivisione paradigmatica dell'incendio utilizzata nella descrizione delle curve RHR, la fase iniziale RHR può corrispondere alle precedenti fasi non solo 1 e 2, ma anche 3; la fase intermedia RHR corrisponde alla fase 4: in assenza di flashover la descrizione di sviluppo sarà ovviamente consona alla situazione instauratasi; la fase finale RHR corrisponde alla precedente fase 5. Oppure, le

precedenti fasi 1 e 2 corrispondono allo stato di pre-flashover, mentre le fasi 4 e 5 allo stato di post-flashover. Ad ogni modo, prescindendo dalla schematizzazione scelta, la seguente panoramica presenta i modelli di simulazione di incendio oggi più diffusi.

Facciamo ora una panoramica dei modelli partendo da quelli più semplici per poi arrivare a quelli più complessi:

- **Curve di Incendio Nominale:** Sono i modelli finora più usati. Con essi vengono descritti incendi post-flashover, nei quali si considera il compartimento coinvolto dall'incendio fin dall'inizio, trascurando la prima fase iniziale. La definizione della curva temperatura dei gas versus tempo è di tipo convenzionale e non dipende da alcun parametro fisico. La temperatura viene assunta uniforme nel compartimento. Non si prevede neppure una fase finale di raffreddamento.

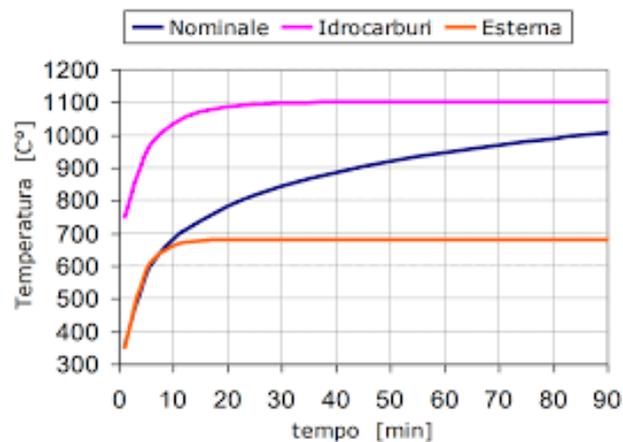


Figura 3: Curva di incendio nominale

- **Curve Parametriche di Incendio:** Anche questi modelli descrivono incendi post-flashover, con temperature uniformi nel compartimento durante tutto l'evento. Si utilizzano però in questo caso alcuni parametri fisici che caratterizzano lo scenario dell'incendio. Inoltre, i modelli parametrici descrivono, anche se in modo approssimato, la fase finale di

raffreddamento. Queste curve, assoggettate ad alcune limitazioni specificate, risultano funzione del carico di incendio, delle caratteristiche geometriche e di ventilazione del locale, e delle proprietà termiche delle pareti.

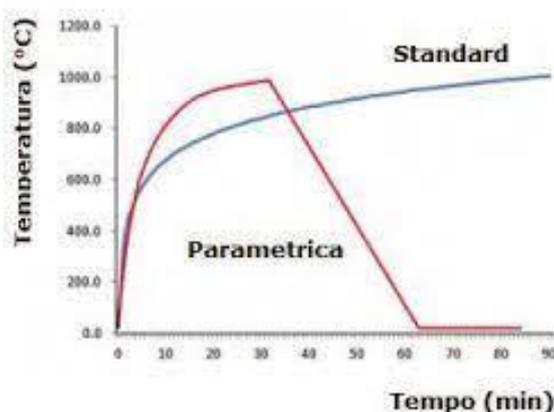


Figura 4: Curve parametriche di incendio e curva di incendio standard

- **Modelli a Zona:** Questi modelli forniscono indicazioni sull' andamento nel tempo delle temperature dei gas prodotti dall' incendio, sulla localizzazione degli strati di gas più caldi rispetto ai più freddi, e sulle caratteristiche di propagazione dei fumi nei volumi chiusi interessati dall' incendio. Particolarità di questi modelli è la suddivisione del compartimento in zone volumetriche all' interno delle quali considerare uniformi talune caratteristiche tipiche dei gas prodotti in un incendio: in particolare le temperature. A seconda del numero di zone considerate, i modelli si distinguono in modelli ad una zona e modelli a più zone, solitamente a due zone.
- **Modelli ad Una Zona:** In questi modelli la temperatura è uniformemente distribuita con unico valore, variabile nel tempo, all' interno del compartimento. Sono pertanto modelli adatti a descrivere un incendio

pienamente sviluppato, tipicamente un incendio post- flashover. L'andamento nel tempo della temperatura dei gas, cioè dell'unico gas virtualmente presente, viene calcolato tramite un bilancio di massa e di energia su tutto il compartimento. L' applicazione di questi modelli richiede una maggiore definizione dei dati di ingresso necessari rispetto ai più semplici modelli nominali e parametrici; tra questi dati ricordiamo la descrizione della frontiera e delle aperture del compartimento nonché il carico di incendio. Elemento di novità è, invece, la necessità di operare una previsione delle modalità di sviluppo dell'incendio, attraverso la definizione della curva RHR di rilascio energetico.

- **Modelli a Più Zone (o Multizonali):** Questi modelli vengono utilizzati quando l'incendio all' interno del compartimento rimane localizzato oppure non arriva al flashover, cioè quando si tratta di incendi di tipo pre-flashover. In questi casi l'ipotesi di unica temperatura uniforme per tutto il volume del compartimento non è più valida. Il più semplice modello è quello a due zone, in cui il compartimento viene diviso appunto in due zone, quella dei gas caldi e quella dei gas freddi, ciascuna con propria unica temperatura uniforme variabile nel tempo. La zona dei gas caldi tenderà man mano a disporsi al di sopra della zona dei gas freddi in modo che l'interfaccia tra le due zone scenda verso il basso. Il collegamento fra le due zone avviene attraverso una sorta di pennacchio che funziona da pompa che trasferisce entalpia dalla zona fredda inferiore, ove sono contenute le risorse energetiche sotto forma di carico di incendio, alla zona calda superiore, rappresentativa in modo anche intuitivo dell'effetto termico dell'incendio. Le equazioni di bilancio di massa ed energia vengono risolte per ciascuna zona, e per ogni zona vengono fornite come dati di uscita le temperature in funzione del

tempo. Altro dato significativo di uscita è la variazione nel tempo dell'altezza di interfaccia strato caldo-strato freddo. Anche questi modelli richiedono in ingresso la previsione delle modalità di sviluppo dell'incendio, ed in molti casi sono presenti sub-modelli che durante tutto il fenomeno controllano la combustione in base alla quantità di ossigeno a disposizione. Un caso particolare di modello multizonale è quello che tratta più compartimenti: gli scambi di massa ed energia avvengono non soltanto fra il compartimento in cui si verifica l'incendio e l'esterno, ma anche fra il compartimento in cui si origina l'incendio e gli altri compartimenti adiacenti. Questa modellazione consente quindi di trattare più di un compartimento alla volta, e non è più necessario considerare come ambiente esterno un compartimento adiacente al compartimento originariamente coinvolto dall' incendio. Poiché spesso una singola stanza assume il ruolo di compartimento, risulta evidente il beneficio; per contro, aumentano la complessità del modello e la complessità dei metodi di controllo e verifica della simulazione. Si ricordi, a tal proposito, che l'uso dei modelli a zone richiede una continua attenzione da parte dell'utilizzatore, il quale deve controllare che le ipotesi di partenza assunte dal modello siano sempre verificate.

- **Modelli di Fluido Dinamica Computazionale:** Sono i modelli matematici più complessi oggi a disposizione. Richiedono particolari conoscenze sia come esperienza numerica che come esperienza descrittiva. I dati di ingresso sono simili a quelli richiesti dai modelli a zone, con l'aggiunta della scelta del modello fluidodinamico appropriato alla situazione in esame. Le equazioni di massa ed energia vengono risolte passo passo all' interno del dominio utilizzato per descrivere il volume del compartimento interessato dall' incendio. La maggiore complessità richiede, inoltre, un impegno di calcolo maggiore

di quello richiesto ai modelli multizonali. Si può raggiungere per contro un livello di dettaglio notevolmente superiore. E' opportuno puntualizzare, tuttavia, che non sempre il modello più sofisticato produce il risultato più utile: ciò dipende infatti dalle finalità della particolare simulazione in esame. Ad esempio, un modello parametrico potrebbe essere utile per una stima rapida, mentre un modello ad una zona potrebbe essere utilizzato per descrivere una situazione post-flashover. Oppure il passaggio da un modello a due zone ad un modello ad una zona potrebbe descrivere l'evoluzione di uno scenario da pre- a post- flashover. Quando invece si richiede uno studio particolarmente dettagliato, i modelli di fluidodinamica computazionale sono da preferire.

L'attività di simulazione degli effetti di un evento ha un posto centrale nel processo di valutazione della sicurezza, ogni modello possiede caratteristiche particolari che ne rendono appropriato l'uso in uno o più contesti particolari.

I modelli che contengono le descrizioni fisiche delle esplosioni sono un complemento alle verifiche sperimentali a supporto delle valutazioni del rischio e/o durante la progettazione o la valutazione delle misure di mitigazione dei danni. I modelli più complessi possono essere applicati a diverse situazioni, ma non devono per questo essere assunti necessariamente come strumenti più precisi. Gli effetti di un'esplosione dipendono da una serie di fattori, quali la pressione massima, la durata di interazione dell'onda d'urto con le strutture, ecc.

Questi fattori a loro volta dipendono da un certo numero di variabili:

- Tipo di sostanza coinvolta;
- Stechiometria del combustibile;
- Tipo di innesco, origine e percorso;
- Confinamento e aperture di sfogo (posizione e dimensione);
- Livello di turbolenza iniziale nell'impianto;
- Rapporti tra volumi liberi e elementi di confinamento;
- Dimensione, forma e posizione degli ostacoli;
- Numero di ostacoli (per un dato rapporto di ostruzione);
- Scala di esperimento/pianta.

Inoltre, la reattività del combustibile ha un effetto importante sulle sovrappressioni generate in una data geometria, come pure la stechiometria della nube di gas. Miscele magre producono sovrappressioni inferiori rispetto alle miscele ricche o stechiometriche. Anche il tipo di innesco influisce sull'energia liberata dall'esplosione, ma considerazioni analoghe riguardano la posizione dell'innesco, la geometria dell'impianto e la presenza di aperture. Uno dei dati più importanti nello studio della propagazione delle esplosioni è quello che emerge dal tipo di flusso: in un ambiente in condizioni stazionarie la reazione comporta generalmente una sovrappressione minore rispetto a quella che si verifica in ambienti con flusso turbolento. Un altro parametro importante, definito dalla letteratura come rapporto di ostruzione (con cui gli Autori traducono "*blockage ratio*", che si esprime con i due termini di ABR – *area blockage ratio* e VBR – *volume blockage ratio*), è la misura di quanto il volume sia congestionato. Esplosioni in impianti con rapporti di ostruzione elevati di solito producono pressioni superiori. Tuttavia, anche la dimensione e la forma degli ostacoli sono fattori importanti da prendere in considerazione. In generale, per un dato rapporto di ostruzione, molti piccoli oggetti danno luogo a pressioni superiori rispetto a oggetti più grandi. Inoltre, la posizione degli ostacoli influisce sulla pressione.

Un modello dovrebbe comprendere tutte le variabili a cui si è accennato. Contemporaneamente, dovrebbe essere basato sulle relazioni fisiche che descrivono il fenomeno in modo adeguato a trattare combustibili e condizioni ambientali differenti senza particolare ricorso a costanti specifiche. Inoltre, il codice del programma che descrive il modello dovrebbe essere numericamente accurato, consentire una rappresentazione della geometria aderente alle necessità con facilità di uso e tempi di elaborazione accettabili.

## Capitolo 2

### *Rischio di incidenti rilevanti*

Il rischio industriale è caratterizzato dal rilascio incontrollato di sostanze sia nelle zone interne che esterne di uno stabilimento, in misura tale da produrre conseguenze dirette o indirette sul personale, sulla popolazione e sull'ambiente. Le sostanze pericolose che vengono generate sono i prodotti ed i composti chimici che provocano effetti sull'organismo umano se inalati, ingeriti o assorbiti oppure possono generare un gran quantitativo di energia termica (sostanze infiammabili) o di energia dinamica (sostanze esplosive o comburenti). La tipologia di incidente che rilascia tali condizioni viene definito come incidente rilevante cioè un evento quale *“un'emissione, un incendio o un'esplosione di grande entità, dovuto a sviluppi incontrollati che si verificano durante l'attività di uno stabilimento industriale e che dia luogo a un pericolo grave, immediato o differito, per la salute umana o per l'ambiente, all'interno o all'esterno dello stabilimento, e in cui intervengono una o più sostanze pericolose”*.

La gravità degli effetti di un incidente dipende dalla modalità attraverso al quale avviene l'esposizione, uno dei parametri più importanti è la distanza dal luogo dell'incidente come anche le misure di mitigazione e protezione adottate. Secondo il tipo di incidente e le caratteristiche delle sostanze coinvolte, gli effetti che si possono verificare si possono diversificare nel seguente modo:

- effetti dovuti al calore e ai fumi della combustione (ustioni, danni alle vie respiratorie, intossicazioni);

- effetti dovuti alle onde d'urto provocate da un'esplosione anche con proiezione a distanza di materiale;
- effetti dovuti a intossicazione acuta procurati da inalazioni, ingestione o contatto con la sostanza (difficoltà respiratorie, perdita di conoscenza ed in casi più gravi anche effetti letali).

Le conseguenze sulla salute umana in caso di esposizione a sostanze tossiche rilasciate nell'atmosfera durante l'incidente, variano a seconda delle caratteristiche delle sostanze, della loro concentrazione, della durata dell'esposizione e della dose assorbita. Sull'ambiente invece gli effetti che si possono verificare sono legati alla contaminazione del suolo, dell'acqua e dell'atmosfera da parte delle sostanze rilasciate e dagli incendi, mentre sulle cose gli effetti da valutare riguardano i danni alle strutture e quindi, ad esempio, crollo di edifici o di sue parti come anche il danneggiamento degli impianti.

Il rischio industriale è funzione della probabilità di accadimento e dalla grandezza delle conseguenze e degli effetti provocati dall'evento incidentale. Gli eventi incidentali che si originano all'interno degli stabilimenti a rischio di incidente rilevante possono essere classificati in base agli effetti dovuti ai rilasci di energia e di materia. Gli eventi pericolosi sono classificati in base al valore del rischio industriale:

- *grande rischio*, evento con alta probabilità e gravi conseguenze per i lavoratori e per la popolazione dell'area limitrofa;
- *rischio medio-basso*, evento comune nella vita dell'impianto, ma con conseguenze trascurabili;
- *rischio raro*, evento molto improbabile, ma con conseguenze rilevanti.

EFFETTI	EVENTI
<b>Irraggiamento</b>	<p><b>Incendi:</b></p> <p><i>Pool-fire: incendio di pozza di liquido infiammabile rilasciato sul terreno;</i></p> <p><i>Jet-fire: incendio di sostanza infiammabile in pressione che fuoriesce da un contenitore;</i></p> <p><i>Flash-fire: innesco di una miscela infiammabile lontana dal punto di rilascio con conseguente incendio;</i></p> <p><i>Fireball: incendio derivante dall'innesco di un rilascio istantaneo di gas liquefatto infiammabile per esempio provocato dal BLEVE.</i></p>
<b>Sovrappressione</b>	<p><b>Esplosione:</b></p> <p><i>VCE Vapour Cloud Explosion: esplosione di una miscela combustibile-comburente all'interno di uno spazio chiuso (serbatoio o edificio);</i></p> <p><i>UVCE Unconfined Vapour Cloud Explosion : esplosione di una miscela in uno spazio aperto;</i></p> <p><i>BLEVE Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion: conseguenza dell'improvvisa perdita di un recipiente in pressione contenente un liquido infiammabile surriscaldato o un gas liquefatto, gli effetti sono dovuti anche allo scoppio del contenitore con proiezione di frammenti.</i></p>
<b>Tossicità</b>	<p><b>Rilascio di sostanze pericolose</b> per l'uomo e per l'ambiente:</p> <p>dispersione di una sostanza tossica nell'ambiente o di un infiammabile non innescato i cui effetti variano in base alle diverse proprietà tossicologiche della sostanza coinvolta. Nella categoria del rilascio tossico può rientrare anche la dispersione dei prodotti tossici della combustione generati a seguito di un incendio in quanto i fumi sono formati da una complessa miscela gassosa contenete particolato, prodotti di decomposizione e di ossidazione del materiale incendiato, gas tossici, ecc.</p>

Tabella 5: Classificazione degli eventi incidentali in base agli effetti.

## 2.2 Analisi e valutazione dei rischi di incidente rilevante

Per una efficace analisi e valutazione dei rischi di incidente rilevante è necessario ricorrere a due tecniche complementari che sono l'analisi incidentale storica e lo studio dell'impatto con metodi predittivi. Con l'analisi incidentale storica, l'analista prende in considerazione gli incidenti che si sono già verificati nello stesso impianto o in impianti analoghi per valutare la possibilità che si possa ripetere lo stesso incidente ed eventualmente l'adozione di misure preventive e mitigative. Con tale analisi possiamo solamente prevenire alcune tipologie di

incidenti, già noti in quanto avvenuti in passato, e, pertanto, deve essere integrata con lo studio dell'impianto con tecniche predittive per identificare quelle sconosciute. L'utilizzo delle tecniche predittive si basa sulla scomposizione dell'impianto in elementi semplici, che possono essere analizzati con maggiore facilità. Per ognuno di questi elementi si individuano i malfunzionamenti che possono generare situazioni di pericolo o indesiderate. Una volta analizzati tutti gli elementi i risultati dell'analisi vengono ricomposti ed integrati in modo da ottenere un elevato grado di copertura di tutti gli eventi incidentali possibili.

Identificati i diversi tipi di incidente occorre valutare la probabilità di accadimento e la magnitudo delle loro conseguenze ai fini dell'individuazione delle adeguate misure preventive e mitigative da mettere in atto. Gli approcci utilizzati per la valutazione della probabilità di accadimento di ciascun evento si può seguire o un approccio semi-quantitativo o rigorosamente quantitativo. Con l'utilizzo del primo approccio vengono classificati tutti gli eventi possibili nella vita utile dell'impianto secondo una scala di probabilità e si valuta il numero degli elementi concomitanti per il verificarsi di un evento dannoso. Maggiore sarà il numero degli elementi concomitanti necessari all'accadimento, minore sarà la probabilità dell'evento stesso. Quando viene utilizzato un approccio rigorosamente quantitativo si assegna un valore probabilistico, definito in termini assoluti, a ciascun evento incidentale individuato viene assegnato un valore di probabilità di accadimento ed attraverso uno schema logico, solitamente di tipo ad albero, viene determinata la probabilità di accadimento dell'incidente. Altra valutazione fondamentale per definire le conseguenze di un incidente è la definizione della portata, della durata e dell'area interessata dal fenomeno al fine di individuare le opportune distanze di sicurezza e le misure mitigative da adottare.

Le principali Autorità nazionali ed internazionali hanno predisposto apposite tabelle che definiscono le soglie minime al di sopra delle quali una certa percentuale di individui subisce un determinato danno per effetto di un incendio,

di un'esplosione o della concentrazione di sostanze tossiche per inalazione di breve durata.

### *2.3 Adempimenti principali*

Ci sono numerose direttive europee, regolamenti, circolari e leggi che individuano i rischi presenti nei diversi ambiti e quelli che sono i fattori inquinanti, dettando, di conseguenza, prescrizioni e indicazioni atti a ridurli.

L'evoluzione della normativa segue il progressivo interesse dei cittadini ai temi dell'ambiente e ai pericoli che incombono sul territorio e allo stato della sicurezza intesa come salvaguardia della salute umana e dell'ambiente. In tal senso è stato introdotto l'obbligo di informazione per la popolazione sui siti industriali ad alto rischio. Il meccanismo completo di attuazione si articola in cinque fasi:

- *la valutazione*, che assicura l'individuazione e l'analisi dei pericoli anche in termini quantitativi e l'identificazione delle opportunità di miglioramento;
- *la verifica*, per il controllo della corretta conduzione della valutazione da parte del fabbricante e l'integrazione con le esigenze del territorio;
- *il miglioramento*, per realizzare gli interventi di prevenzione e protezione, sia sugli impianti sia sul territorio, onde ridurre al minimo il rischio residuo;
- *la pianificazione*, finalizzata alla gestione del rischio residuo e alla massima riduzione delle conseguenze incidentali;

- *l'informazione*, che garantisce il diritto alla conoscenza della popolazione e la pone in grado di agire per mettere in atto i necessari comportamenti di auto-protezione.

I gestori delle aziende a rischio di incidenti rilevanti devono assolvere a una gradualità di obblighi in funzione della quantità di sostanze pericolose detenute. Infatti essi devono prendere tutte le misure idonee a prevenire gli incidenti rilevanti e a limitarne le conseguenze per l'uomo e per l'ambiente nel rispetto dei principi e delle normative vigenti in materia di sicurezza e igiene del lavoro e di tutela della popolazione e dell'ambiente; devono provvedere all'individuazione dei rischi di incidenti rilevanti, integrare il documento della valutazione del rischio richiesto dalle leggi vigenti ed adottare le opportune misure di sicurezza; provvedere all'informazione ed alla formazione e quindi all'addestramento di coloro che lavorano nel sito. Inoltre se lo stabilimento supera le soglie più elevate di detenzione di sostanze pericolose bisogna redigere il rapporto di sicurezza che dovrà contenere anche l'inventario aggiornato delle sostanze presenti nello stabilimento ed anche le informazioni che possono consentire di prendere decisioni in merito all'insediamento di nuovi stabilimenti.

## *2.4 Principali effetti dell'incendio*

Le sostanze pericolose possono causare, in caso di incidente rilevante, gravi fenomeni che nelle peggiori situazioni possono rivelarsi letali. La storia stessa della direttiva Seveso si sviluppa in seguito all'accadimento di incidenti rilevanti che sono stati all'origine di gravi fenomeni di inquinamento e di danno di natura diversa ma altrettanto gravosi. Tra le conseguenze più frequenti relativamente all'insorgere di fenomeni di inquinamento generati da incidenti rilevanti avremo tre eventi che saranno quasi sempre presenti:

- Nube tossica: a seguito di un 'esplosione, di un incendio o di una semplice fuoriuscita da un reattore la sostanza inquinante tende a muoversi nell'atmosfera mantenendo una certa compattezza e densità. La nube tossica è una vera e propria nuvola soggetta all'azione dei venti che poi tende ad allargarsi e a diffondersi nei territori circostanti alla zona interessata dall'incidente. Col trascorrere del tempo la pericolosità dell'inquinante tende a diminuire così come diminuisce la sua concentrazione nell'atmosfera. L'incidente del 1976 di Seveso causò una nube tossica di diossina che contaminò il territorio anche dei Comuni confinanti determinando l'insorgenza di numerose infezioni e malattie polmonari oltre che la morte di numerosi animali. Per effettuare la bonifica dei terreni si ritenne necessaria l'evacuazione della popolazione e l'asportazione della parte superficiale del terreno esposto alle sostanze inquinanti.
- Esplosione: consiste in un improvviso rilascio di energia di differente natura. L'incontrollato aumento della pressione di un fluido all'interno di un serbatoio può determinare il cedimento strutturale dello stesso e generare un'esplosione con conseguente proiezione di detriti. Tale rilascio di energia si manifesta con una violenta onda di pressione che investe gli ostacoli producendo danni in funzione della superficie investita e della distanza dall'origine dell'esplosione. Se l'esplosione investe impianti produttivi può provocare perdite dai serbatoi di fluidi gassosi inquinanti ad alte temperature, con la conseguente dispersione nell'atmosfera o sversamento di inquinanti nel terreno.
- Sversamento: avviene a seguito dell'incontrollato rilascio di sostanze pericolose nell'ambiente, ciò potrebbe essere la conseguenza del cedimento di opere di contenimento. Lo sversamento può avvenire

direttamente nei corsi d'acqua o attraverso infiltrazioni che possono inquinare fino alle falde acquifere.

## 2.5 Prevenzione incendi

La sicurezza antincendio è orientata alla salvaguardia dell'incolumità delle persone ed alla tutela dei beni e dell'ambiente, mediante il conseguimento dei seguenti obiettivi primari:

Numero	Obiettivo
0	Ridurre le occasioni di incendio (prevenire l'incendio)
1	Garantire la capacità portante dell'edificio per un periodo di tempo determinato
2	Limitare la propagazione del fuoco e dei fumi all'interno dell'edificio
3	Limitare la propagazione del fuoco ad edifici vicini
4	Consentire agli occupanti di lasciare l'edificio indenni o di essere soccorsi
5	Consentire la sicurezza delle squadre di soccorso

Tabella 6: Obiettivi sicurezza antincendio

Il rischio di ogni evento incidentale, nel caso dell'incendio, risulta definito da due fattori:

- la frequenza, cioè la probabilità che l'evento si verifichi in un determinato intervallo di tempo;
- la magnitudo, cioè l'entità delle possibili perdite e dei danni conseguenti al verificarsi di un determinato evento.

Dalla combinazione di questi due fattori otteniamo la definizione di rischio:

$$\text{Rischio} = \text{Frequenza} \times \text{Magnitudo}$$

Da questa formula appare evidente che più il rischio è direttamente proporzionale alla frequenza e alla magnitudo, quindi una riduzione di uno dei due fattori comporta anche una riduzione del rischio.

L'attuazione di tutte le misure per il ridurre il rischio mediante la riduzione della sola frequenza viene comunemente chiamata prevenzione, mentre l'attuazione di tutte le misure tese alla riduzione della sola magnitudo viene definita protezione. In particolare le misure di Protezione Antincendio possono essere di tipo attivo o passivo, la differenza sta nella necessità, da parte di un operatore o di un impianto, di effettuare un intervento per la loro attivazione. Bisogna precisare che le misure preventive e protettive non devono essere considerate alternative ma complementari tra loro, devono essere intraprese entrambe proprio al fine di ottenere risultati ottimali.

I progetti di sicurezza, se non vengono applicati e considerati correttamente le misure precauzionali d'esercizio, possono essere vanificati



Figura 5: schema prevenzione

Le principali misure di prevenzione incendi, finalizzate alla riduzione della probabilità di accadimento di un incendio, possono essere individuate in:

- realizzazione di impianti elettrici a regola d'arte;
- collegamento elettrico a terra di impianti, strutture, etc;
- installazione di impianti parafulmine;
- dispositivi di sicurezza degli impianti di distribuzione e di utilizzazione delle sostanze infiammabili;
- ventilazione dei locali;
- utilizzazione di materiali combustibili;
- adozioni di pavimenti ed attrezzi antiscintilla;
- segnaletica di sicurezza adeguata soprattutto ai diversi tipi di rischi presenti negli ambienti di lavoro.

Adottando misure precauzionali, si pone l'obiettivo, attraverso una corretta gestione, di non aumentare il livello di rischio ma di renderlo accettabile attraverso opportune misure di prevenzione e protezione. Per adottare misure precauzionali adeguate bisogna seguire il seguente iter:

- 1) analizzare le cause più comuni degli incendi;
- 2) effettuare opportuna informazione e formazione antincendio;
- 3) controllare adeguatamente gli ambienti di lavoro e le attrezzature;
- 4) effettuare manutenzione ordinaria e straordinaria.

Solo applicando in maniera opportuna le seguenti indicazioni si può ottenere una protezione antincendio efficace con una riduzione dei danni conseguenti al verificarsi dell'incendio ed agendo, di conseguenza, sulla magnitudo dell'evento.

Gli interventi, come abbiamo già anticipato, si suddividono in misure di protezione attiva o passiva. Le misure di protezione passiva non necessitano dell'intervento di un operatore e/o dell'azionamento dell'impianto, ed hanno l'obiettivo di limitare gli effetti dell'incendio. Le più comuni misure di

protezione adottate sono: barriere antincendio interposte tra zone potenzialmente soggette ad incendio, strutture aventi caratteristiche di resistenza al fuoco proporzionate ai carichi d'incendio, sistemi di vie d'uscita commisurate al massimo affollamento ipotizzabile dei luoghi di lavoro ed alla pericolosità delle lavorazioni, sistemi di ventilazione e materiali classificati per la reazione a fuoco. Le misure di protezione attiva sono invece finalizzate alla pronta rilevazione dell'incendio, alla segnalazione ed allo spegnimento dello stesso. Le principali misure di protezione utilizzate sono: gli estintori, la rete idrica antincendio, gli impianti di rilevazione automatica d'incendio, gli impianti di spegnimento automatici, i dispositivi di segnalazione e d'allarme e gli evacuatori di fumo e di calore.

Tale quadro permette di evidenziare la natura multidisciplinare della progettazione strutturale antincendio. Una verifica effettiva e sostanziale va al di là di semplici confronti numerici e soddisfacimenti di stereotipi normativi. Questa necessità di analizzare gli aspetti più accurati dell'evoluzione di un incendio ha fatto sì che la sua analisi interessasse sempre di più la modellazione fluidodinamica computazionale. Con tale strumento è possibile studiare sistemi molto complessi che non sono riproducibili sperimentalmente, simulare, senza pericolo, sistemi ad elevato rischio e consentendo così un utilizzo immediato dei risultati forniti per un'analisi integrata ed accurata ai fini progettuali.

## Capitolo 3

### *La Fluidodinamica Computazionale*

La fluidodinamica computazionale (comunemente chiamata CFD, Computational Fluid Dynamics) è un metodo che utilizza l'analisi numerica per studiare la dinamica dei fluidi e i relativi fenomeni associati. Questa metodologia permette di simulare i trasferimenti di massa e di calore o le reazioni chimiche e fisiche in cui sono coinvolte le varie sostanze.

La modellazione CFD è uno strumento ormai ampiamente utilizzato sia in ambito accademico che industriale. Essa permette lo studio di sistemi fisici che coinvolgono fenomeni di trasporto di calore, materia e quantità di moto, anche in presenza di reazioni chimiche. La gamma di diversi campi di applicazione è estremamente varia estendendosi a tutti i settori dell'ingegneria.

Questo tipo di approccio inizia ad essere utilizzato in maniera significativa al intorno agli anni '70, al crescere della potenza computazionale a disposizione. Nel tempo questa tecnica ha ottenuto maggiore flessibilità geometrica, diventando capace di modellare ambienti sempre più complessi ed ha sviluppato nuovi modelli per descrivere fenomeni fisici come la turbolenza, fluidi multifase, interazione fluido-struttura, scambio di calore, etc.

La CFD è dunque diventata parte integrante del processo di progettazione grazie alla possibilità di analizzare le prestazioni delle applicazioni industriali prima della loro produzione, dando così vita ad un prodotto ottenuto in tempi più brevi e con costi maggiormente contenuti incentivando lo sviluppo tecnologico di progetti che sarebbero impossibili da studiare solamente tramite test sperimentali.

La fluidodinamica computazionale si basa sulla risoluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes, ovvero un sistema di equazioni differenziali alle derivate che delineano il comportamento di un fluido. Con questo metodo il dominio di interesse viene suddiviso in celle o volumi di controllo. In ciascuna di queste celle è possibile riscrivere le equazioni di Navier-Stokes come equazioni algebriche che mettono in relazione velocità, temperatura, pressione e altre variabili, con valori nelle celle vicine. Queste equazioni vengono risolte numericamente, dando un quadro completo del flusso fino alla risoluzione della griglia. L'insieme di equazioni risultanti può quindi essere risolto iterativamente dando così una descrizione completa del flusso in tutto il dominio.

I modelli matematici sono sviluppati come approssimazione della realtà, sulla base di questi modelli è necessario lo sviluppo di modelli numerici per ottenere delle soluzioni approssimative per la soluzione del problema fisico. Per convalidare i modelli numerici è necessario confrontare i risultati numerici ottenuti con dei risultati sperimentali. Sono ormai disponibili svariati codici CFD ognuno dei quali caratterizzato da diverse peculiarità e spesso specifici per lo studio di determinate tipologie di fenomeni. Essi hanno raggiunto dei livelli di complessità notevoli mantenendo tuttavia sempre la medesima struttura generale formata da tre parti principali a cui corrispondono altrettante fasi della simulazione fluidodinamica.

### *3.2 Le fasi della simulazione fluidodinamica*

La prima fase è il preprocessing che comprende al suo interno:

1. definizione del dominio computazionale;
2. creazione della mesh, cioè della griglia di calcolo;
3. definizione delle proprietà dei fluidi e dei fenomeni fisici e chimici coinvolti;
4. definizione di condizioni al contorno appropriate.

La risoluzione delle equazioni che descrivono il moto dei fluidi e i fenomeni fisici e chimici viene effettuata solo in corrispondenza di un numero limitato di punti dello spazio, detti nodi, distribuiti all'interno della mesh in corrispondenza delle celle di calcolo. Ciò rappresenta ovviamente una approssimazione in quanto si cerca di descrivere un fenomeno intrinsecamente continuo nello spazio, limitandosi a considerare solo alcuni punti. Come tutte le approssimazioni ciò introduce un errore nella soluzione numerica rispetto alla soluzione esatta. Più è alto il numero di nodi della griglia e più ci si avvicina a una descrizione continua dello spazio, riducendo l'errore e ottenendo una soluzione numerica più accurata. È altresì vero che l'aumento del numero di nodi, quindi del numero di volte in cui vengono risolte le equazioni prima nominate, implica maggiori oneri computazionali andando ad incrementare i tempi di calcolo necessari. Si pone quindi la necessità di raggiungere un compromesso tra questi due fattori andando a risolvere il problema di ottimo corrispondente. La costruzione della mesh rappresenta in assoluto l'operazione più delicata nella definizione di una simulazione fluidodinamica. Essa, infatti, deve avere proprietà e caratteristiche tali da garantire la risoluzione di tale problema di ottimo, fornendo una soluzione numerica che sia affidabile e accurata mantenendo altresì dei tempi di calcolo accettabili.

La seconda fase interessa il risolutore numerico o solver. Consiste nel codice di calcolo che discretizza le equazioni di trasporto da risolvere utilizzando la mesh e le informazioni fornite nel preprocessing, per poi risolvere tali equazioni discretizzate. I metodi di approccio al problema possono essere diversi tra cui i più comuni sono:

1. le differenze finite;
2. i volumi finiti;
3. gli elementi finiti;
4. i metodi spettrali.

Da un punto di vista generale il solver effettua una approssimazione delle funzioni incognite attraverso delle funzioni semplici. Discretizza le equazioni di trasporto attraverso la sostituzione delle approssimazioni definite precedentemente e risolve dunque le equazioni discretizzate.

L'ultima fase detta postprocessing è effettuata a posteriori dalla risoluzione delle equazioni di trasporto. Essa si compone di:

1. la visualizzazione dei dati ottenuti;
2. l'analisi di tali dati;
3. l'interpretazione dei risultati ottenuti.

### 3.3 Simulazioni della formazione di inquinanti

I modelli CFD alla loro base hanno la descrizione della meccanica dei fluidi che si basa sulle equazioni di Navier-Stokes. In particolare, queste equazioni delineano il comportamento di un fluido e compaiono come essenziali nello studio di svariati fenomeni fisici. Sono delle equazioni differenziali alle derivate parziali e furono formalizzate da Claude-Louis Navier e George Stokes intorno alla metà del XIX secolo. Queste equazioni sono state derivate tramite l'utilizzo delle equazioni di conservazione della massa e di conservazione della quantità di moto, dando vita ad un modello matematico in grado di descrivere interamente le caratteristiche di un fluido.

Tra le applicazioni di maggiore interesse dei modelli CFD vi è la combustione turbolenta di idrocarburi gassosi. L'integrazione numerica diretta delle equazioni di Navier-Stokes non è una strada percorribile per flussi turbolenti di interesse pratico. E' invece possibile ottenere delle informazioni statistiche sul campo di moto attraverso la risoluzione di equazioni mediate: ogni grandezza generica  $\Phi$  è decomposta in un valore medio ed uno fluttuante, dove il termine fluttuante è modellato attraverso modelli di turbolenza. Questa informazione è alquanto più limitata rispetto a quella delle equazioni di Navier-Stokes ma attualmente è l'unica ottenibile con i mezzi di calcolo disponibili. Il modello di turbolenza è il modello  $\kappa - \varepsilon$  in cui si definisce una viscosità turbolenta per tener conto dei termini fluttuanti. La viscosità turbolenta  $\mu_t$  è funzione dell'energia cinetica turbolenta  $\kappa$ , del tasso di dissipazione viscosa dell'energia cinetica turbolenta  $\varepsilon$  e della densità della corrente  $\rho$  mediante la seguente relazione:

$$\mu_t = C_\mu \rho \kappa^2 / \varepsilon$$

Dove  $C_\mu$  è una costante a cui viene assegnato solitamente il valore 0.9.

L'energia cinetica turbolenta  $\kappa$  e il suo tasso di dissipazione viscosa  $\varepsilon$  sono determinati risolvendo le relative equazioni di trasporto. L'equazione dell'entalpia è risolta contemporaneamente a quella dell'energia turbolenta e del suo tasso di dissipazione viscosa per tenere in conto termini di scambio termico radiativo. Questi ultimi considerano sia l'emissività della fase gassosa che quella delle strutture particellari.

Il modello  $\kappa - \varepsilon$  sebbene non esente da inconvenienti è di gran lunga il modello più utilizzato in letteratura per la sua completezza e semplicità.

Anche con questo modello semplificato di turbolenza non è possibile utilizzare modelli cinetici dettagliati per modellare il valore medio e le fluttuazioni delle concentrazioni delle specie coinvolte nelle reazioni di ossidazione e pirolisi. L'utilizzo di schemi cinetici complessi e d'altra parte necessario se si vuole modellare non solo l'evoluzione della fiamma in termini di dimensioni del plume e di profili di temperatura ma anche la formazione di specie inquinanti.

Nel caso di reazioni chimiche molto veloci, così come sono le reazioni di ossidazione e di pirolisi di idrocarburi, è possibile introdurre una ulteriore ipotesi esemplificativa. In questo caso, infatti, i tempi caratteristici delle reazioni di ossidazione e pirolisi sono piccoli se paragonati ai tempi caratteristici della turbolenza fluidodinamica e quindi il campo termo-chimico si trova in uno stato di quasi equilibrio, in quanto si adatta in maniera praticamente istantanea alle variazioni di composizione della miscela imposte dal campo di moto fluidodinamico. Questa ipotesi permette di considerare disgiunti i fenomeni chimici da quelli fluidodinamici in quanto la velocità di reazione è funzione solo della temperatura e del rapporto di equivalenza locale.

Con queste approssimazioni, la fiamma turbolenta può essere vista come un insieme di sottili fiammelle laminari trasportate dalla turbolenza, che sono funzioni locali del rapporto di miscelamento e della dissipazione scalare. La cinetica chimica dettagliata viene studiata all'interno di queste geometrie di

combustioni laminari al variare della velocità di alimentazione dei reagenti e della temperatura di fiamma. In questo modo viene costruita una libreria di fiamme laminari utilizzata per la chiusura termochimica dei sistemi. Nell'ambito del nostro studio, nell'analisi del rischio di un incendio, è di notevole rilevanza anche la formazione di inquinanti. Il fine è quello di risolvere le equazioni di bilancio di quantità di moto, energia e di massa usando un modello di turbolenza. Con tali modelli si riproduce con un buon livello di approssimazione la formazione sia di specie stabili maggioritarie che di specie in traccia quali composti pirolitici, benzene e idrocarburi policiclici. Il grado di conversione dell'idrocarburo e la formazione di CO e CO<sub>2</sub> non sono fortemente influenzati dalla miscela idrocarburica. Al contrario, la composizione della miscela idrocarburica influenza fortemente la formazione di specie inquinanti. Il modello termo-fluidodinamico riproduce con un buon livello di approssimazione il campo termico e la concentrazione di specie stabili. Da precisare che in letteratura non sono disponibili dati sperimentali per la verifica della capacità di simulazione di inquinanti in traccia, pertanto, la loro predizione può essere utilizzata soltanto per analisi comparative sull'effetto di parametri operativi sulla loro formazione.

Il codice fluidodinamico è utilizzato per effettuare una stima attraverso un'analisi modellistica delle fiamme turbolente di idrocarburi gassosi che si stabilizzano sulle torce industriali. Le torce elevate sono state modellate come fiamme turbolente non simmetriche in aria stagnante stabilizzate su camini di differenti diametri. La necessità di simulare non solo la struttura della torcia in termini di dimensioni del plume ed efficienza di combustione, ma anche l'emissione di specie inquinanti ha richiesto l'utilizzo di uno schema cinetico dettagliato in grado di seguire l'evoluzione pirolitica ed ossidativa dei differenti idrocarburi, aromatici ed alifatici, scaricati in torcia. Per le fiamme sono stati determinati i profili di temperatura e di concentrazione della specie, l'efficienza di combustione, i fattori di emissione per il monossido di carbonio, gli idrocarburi

incombusti metanici e non, il benzene e gli idrocarburi policiclici aromatici. In particolare, le specie chimiche più utilizzate sono riportate nella seguente tabella:

<b>Gruppo</b>	<b>Composto</b>
	Anidride carbonica
	Monossido di carbonio
	Idrogeno
	Acqua
UHC metanici	Metano
	Formaldeide
UHC non-metanici	Etano
	Etilene
	Acetilene
	Acetaldeide
	Propano
	Propene
	Propino
	Allene
	Butano
	Butene
	Butadiene
	Pentano
	Ciclopentadiene
Benzenici	Benzene

	Toulene
Idrocarburi Policiclici Aromatici (PAH)	Naftalene
	Acenaftilene
	Fenantrene
Particolato	Fuliggine

Tabella 7

L'utilizzo dello schema cinetico permette di ottenere mappe bidimensionali di concentrazione di tutte le specie esaminate. Da essa, infatti, è possibile ottenere l'efficienza di combustione e i fattori di emissione degli inquinanti dove l'efficienza della combustione è definita come:

$$\eta = \frac{\text{massa C in forma di CO}_2}{\text{massa C come idrocarburo alimentato}}$$

L'efficienza della combustione è fortemente influenzata dalla velocità trasversale dell'aria. Infatti, si può osservare che maggiore è la velocità trasversale dell'aria minore è l'efficienza di combustione. La stessa osservazione può essere effettuata in relazione all'emissione delle specie inquinanti che diminuiscono all'aumento della velocità dell'aria trasversale.

I prodotti di combustione raggiunto un massimo di concentrazione nella zona di combustione primaria, diminuiscono in concentrazione allontanandosi dalla fiamma fino a raggiungere il livello di concentrazione medio nell'atmosfera. La velocità delle reazioni di combustione rallenta per effetto della diluizione dei reagenti e della diminuzione di temperatura fino ad arrivare a velocità di reazione

trascurabili rispetto ai tempi di caratteristici della miscelazione con aria circostante.

Nella nota Tecnica dell'Università Alberta si definisce una half-mean temperature quale rappresentativa della struttura del plume:

$$\frac{T_{0.5} - T_{00}}{T_{max} - T_{00}} = 0.5$$

Dove:

- $T_{0.5}$  è la half-mean temperature
- $T_{max}$  è la temperatura massima raggiunta in fiamma
- $T_{00}$  è la temperatura ambiente

Nella maggior parte dei casi  $T_{max}$  varia tra 1850K e 2050K da cui risulta una  $T_{0.5}$  pari a circa 1100K. Tale valore rappresenta ragionevolmente il limite di temperatura sotto il quale tutte le velocità di ossidazione e pirolisi in fase gassosa possono ritenersi trascurabili.

Riuscire ad ottenere una buona predizione degli inquinanti che si formano durante le reazioni di combustione è importante per ottenere una buona gestione di sicurezza degli ambienti a rischio incendi.

### *3.4 CFD nella Sicurezza*

L'applicazione di strumenti e di metodi CFD nell'ingegneria della sicurezza è piuttosto recente se comparata ad altri settori come l'aeronautico e le turbo macchine. Dopo un lungo processo di validazione il CFD sta ora raggiungendo uno stadio maturo guadagnandosi l'accettazione per applicazioni nel campo degli ambienti chiusi. Se usato correttamente ha le potenzialità per fornire una nuova importante visione e una comprensione fisica migliore del fenomeno, sia nella fase di progetto che come strumento di verifica delle assunzioni progettuali. Risulta essere uno strumento essenziale ogni volta che sono richieste informazioni dettagliate sulla stratificazione del fumo, sulla visibilità, sulla temperatura, sulla radiazione e sulle concentrazioni di sostanze inquinanti. Può inoltre risultare inestimabile anche per l'analisi di componenti particolari o di metodi di ventilazione.

Con l'entrata in vigore del D.M. 9 maggio 2007 "Direttive per l'attuazione dell'Approccio Ingegneristico alla Sicurezza Antincendio" viene sancito, anche da un punto di vista normativo, la possibilità del ricorso alle metodologie dell'ingegneria antincendio prestazionale, Fire Safety Engineering, come strumento di analisi per la progettazione nell'ambito della sicurezza antincendio. Una delle sfide di questo nuovo approccio è comprendere quanto a fondo bisogna incidere con misure protettive sia impiantistiche che gestionali per la riduzione del rischio, potendosi virtualmente porre nuovi scenari o ulteriori interventi. Nell'ultimo decennio la Fire Safety Engineering ha giovato del continuo progresso della fluidodinamica computazionale, sia sul piano della ricerca sulla modellazione dei fenomeni fisici, sia dal punto di vista della implementazione tecnologica di tali modelli mediante algoritmi di calcolo e grazie alla potenza sempre crescente dei calcolatori elettronici.

L'approccio basato sulla simulazione del fenomeno di incendio sta diventando maturo al punto da essere impiegato, con discreti risultati, nell'ambito della "2Fire Investigation" ossia l'analisi dei fenomeni di incendio al fine di poter caratterizzare con una buona probabilità gli accadimenti in un determinato luogo in seguito di un incidente o di un evento delittuoso.

I metodi simulativi vengono iniziati a partire da dati ed evidenze raccolti in campo e successivamente osservati e tendono a riprodurre la "scena d'incendio", ricostruendo i processi di combustione, spiegando lo sviluppo delle fiamme e dimostrando il movimento del fumo descrivendo a posteriori, la configurazione del combustibile, gli effetti della ventilazione, l'impatto dei sistemi di protezione passiva e attiva e la sorgente di innesco.

### *3.5 Il Modello CFD utilizzato: AIR*

AIR è un modello di fluidodinamica computazionale dedicato a sistemi quali fuoco, aria condizionata e alla dispersione di fumo all'interno ed intorno agli edifici.

In particolare AIR prevede:

- modelli di flusso d'aria e velocità;
- temperatura;
- umidità relativa, evaporazione e condensazione dei liquidi;
- dispersione di fumo o di sostanze inquinanti;
- concentrazioni di specie di condensazione.

Le soluzioni possono essere sia allo stato stazionario che dipendenti dal tempo. La forma dell'edificio e le strutture interne sono specificate usando le forme dei

blocchi fondamentali. Il codice controlla le incongruenze nelle specifiche di input e verifica i bilanci di massa e di energia.

La griglia di calcolo è cartesiana con dimensioni delle celle variabili in ogni codice. A qualsiasi livello possono essere incorporate delle griglie più piccole col fine di migliorare la risoluzione e l'efficienza. La griglia viene generata automaticamente dalla specificazione del numero massimo di celle e delle regioni in cui sono richiesti dei dettagli più accurati.

Le soluzioni sono visualizzate in un pacchetto grafico dedicato che presenta differenti tonalità dipendenti dalla temperatura, umidità, dai carichi di calore, dai tassi di evaporazione/condensazione e vettori di velocità. Si possono selezionare viste sia sezionali che tridimensionali ed è disponibili anche un'animazione dei campi delle velocità.

L'interfaccia utente utilizzata è Airview ed ha lo scopo di:

- sviluppare i file di input per i calcoli;
- eseguire i calcoli di Air;
- accedere alle uscite grafiche e di testo.

Airview produce un file in formato ascii che è l'input del codice di calcolo di Air. I diversi moduli presenti contengono i dati specificati dall'utente per i confini geometrici, le condizioni al contorno e tutte le altre condizioni per i calcoli.

Tutte le specifiche di Air sono eseguite nella sequenza in cui appaiono nelle liste dei dati. Pertanto, tutte le condizioni specificate restano in vigore fino a quando non vengono modificate per una specifica successiva.

## Capitolo 4

### *Scenari e Simulazioni*

#### *4.1 Simulazioni d'incendio del tunnel Runehamar*

L'incendio in una galleria stradale non è un evento estremamente raro e, per la severità delle conseguenze, da sempre occupa un posto di rilievo nella definizione progettuale ed operativa dei sistemi di trasporto. L'attuale crescita dell'uso del sottosuolo, che si sta concretando nello sviluppo di reti sotterranee con gallerie stradali sempre più lunghe e trafficate, comporta un consistente aumento dei fattori di rischio, richiedendo ai progettisti ed agli operatori del settore una rinnovata attenzione ed interesse.

Molte organizzazioni internazionali e nazionali si sono già attivate per aggiornare lo stato delle conoscenze in materia mediante ricerche, sperimentazioni in scala reale ed elaborazioni numeriche della complessa fenomenologia. I responsabili dei sistemi di trasporto e i loro progettisti stanno iniziando ad avviare realizzazioni innovative, adottando strumenti che potranno garantire migliori livelli di sicurezza antincendio.

Un utile strumento a supporto di una serie di tematiche inerenti alla sicurezza in galleria (dislocazione dei luoghi sicuri, preparazione dei piani di evacuazione, dimensionamento dei sistemi ausiliari, controllo dei sistemi di ventilazione, ecc.), è rappresentato dai codici di calcolo della computational fluid dynamics, che

consentono di indagare il campo di moto di masse fluide e l'andamento dei parametri termodinamici ad esse connesse.

La fluidodinamica, detta anche CFD, acronimo di computational fluid dynamics si occupa dello studio dei metodi, tecniche ed algoritmi, che consentono di simulare il comportamento dinamico dei fluidi in complessi problemi fisici. Tale simulazione consiste nell'elaborazione numerica di sofisticati modelli matematici che descrivono l'evoluzione temporale del fluido attraverso i suoi parametri fluidodinamica fondamentali: velocità, temperatura, densità, pressione. Nella pratica, questo strumento di simulazione virtuale è in grado di fornire risposte coerenti con la realtà, in tempi e costi decisamente ridotti rispetto a quanto necessario per realizzare la sperimentazione fisica. Questo è, infatti, uno dei principali motivi che rende la CFD un mezzo estremamente vantaggioso in sede di analisi progettuale: essa permette di eseguire, in maniera abbastanza semplice e, in ogni caso, sempre più agevole rispetto all'indagine reale, parametrizzazioni per differenti condizioni al contorno, consentendo di valutare le risposte dei componenti in esame in condizioni operative vicine alla realtà fisica. Un altro vantaggio della CFD è l'indipendenza dal fattore di scala, questo permette l'eliminazione di problemi, a volte molto importanti o di difficile e costosa risoluzione, di visualizzazione dei parametri fluidodinamici nella simulazione su prototipi reali.

Le simulazioni eseguite nel presente lavoro, volte all'indagine di scenari incidentali in galleria con conseguente sviluppo e propagazione d'incendio, sono state effettuate con il codice di simulazione AIR. Esse ripercorrono le fasi riguardanti l'incendio di un rimorchio nella galleria Runehamar. La scelta è ricaduta su questa particolare galleria perché per essa sono disponibili tutte le informazioni necessarie alla simulazione (altezza: circa 9 metri; lunghezza: circa 1,6 km; larghezza: circa 12m). In particolare, è stato preso in considerazione solo un tratto rettilineo di 100 metri; l'innesco dell'incendio è localizzato in una zona posta ad una distanza di 30 metri dall'inizio del tratto in questione.

Le caratteristiche di questo codice lo rendono particolarmente adatto alla simulazione degli incendi in galleria in virtù del fatto che queste posseggono i tratti distintivi di luoghi confinati (una galleria, con le sue pareti, delimita un volume che, se paragonato ad un parallelepipedo risulta chiuso su quattro dei suoi lati) e di quelli aperti (i flussi di grosse masse d'aria non sono, in questa categoria di problemi, trascurabili, così come accade per i tunnel).

Il modello utilizza le condizioni al contorno, il carico d'incendio, la geometria degli elementi solidi, che definiscono i limiti dello spazio di interesse, e le zone d'immissione d'aria, definite dall'utente, per predire le distribuzioni tridimensionali di un elevato numero di variabili all'interno dello spazio considerato. Il modello geometrico da analizzare al computer viene realizzato definendo le superfici che racchiudono il dominio di fluido da analizzare. Nelle analisi fluidodinamiche ciò che interessa è tutto meno il corpo stesso, il quale, in questo caso, funge solo da confine per il fluido.

Per la realizzazione della geometria del tunnel sono state inserite alcune approssimazioni. La prima consiste nel considerare un tratto rettilineo, data la scarsa influenza delle curve sui flussi d'aria e sui fumi; la seconda riguarda le pendenze longitudinali e trasversali, entrambe ritenute nulle: tale semplificazione è stata effettuata in quanto dati gli scarsi valori di pendenza, tenendone conto si sarebbe dovuto utilizzare una griglia molto più finemente suddivisa con incrementi esponenziali dei tempi di calcolo. Gli elementi solidi, necessari a definire la forma degli edifici e di quant'altro si trovi al loro interno, sono specificati utilizzando la combinazione di un ridotto numero di forme fondamentali (figura 7).

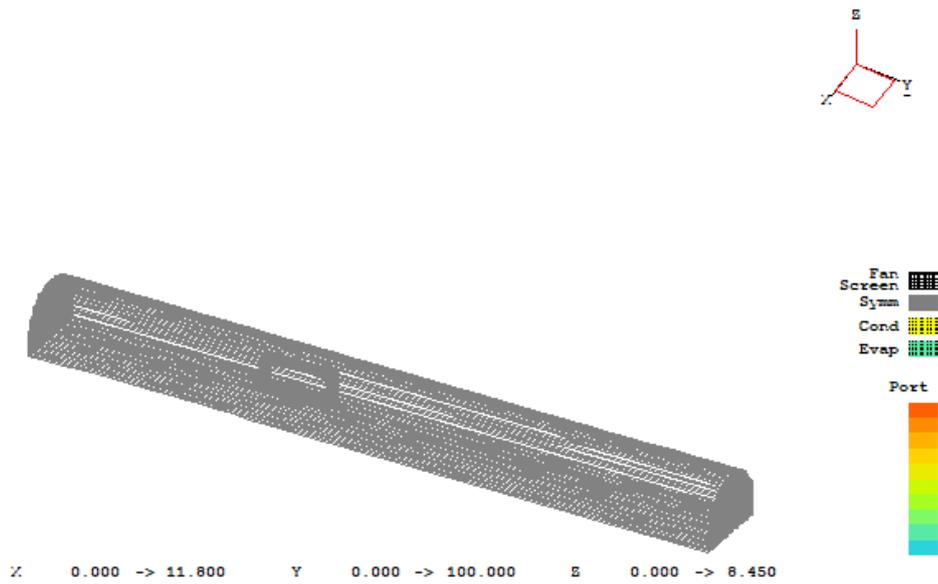


Figura 7: Rappresentazione grafica in 3D del tunnel Runehamar.

La griglia computazionale utilizzata è cartesiana e le dimensioni delle celle, in ognuna delle tre direzioni principali, possono essere definite indipendentemente tra loro (figura 8)

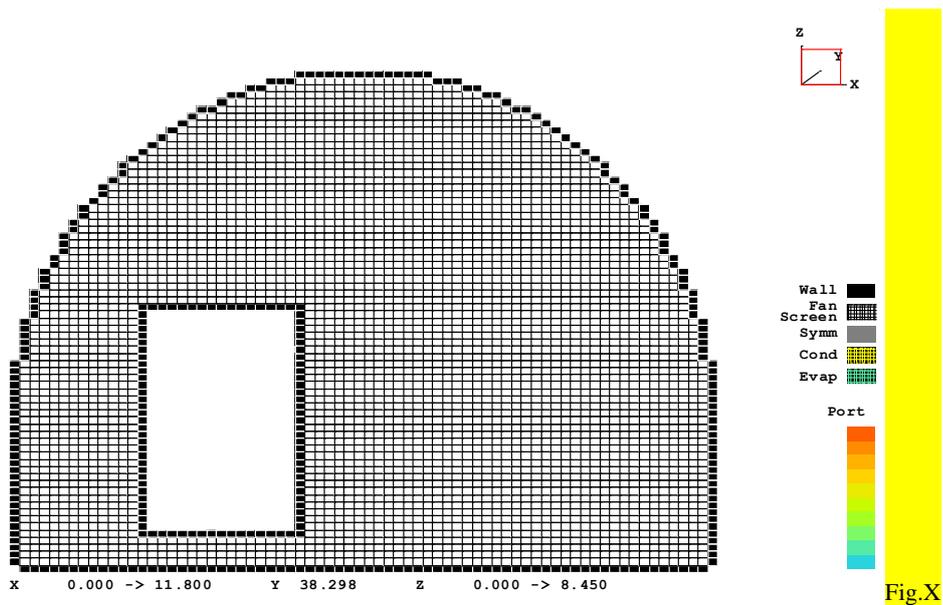


Figura 8: Rappresentazione in 2D della galleria

Utilizzando i dati inerenti alle dimensioni geometriche, che ricalcano quelle del tunnel Runehamar, nel sistema di riferimento mostrato in figura 8, è stata disegnata la geometria del tunnel; al suo interno, contemporaneamente, è stata realizzata la struttura del rimorchio. Il codice provvede ad effettuare, all'interno dello spazio indagato, un bilancio di energia e di massa. A tal proposito è necessario inserire come dati in ingresso, oltre a quelli utilizzati per la realizzazione della geometria, quelli che si riferiscono alla velocità di rilascio del calore (HRR: heat release rate) dell'elemento che sta bruciando (figura 9).

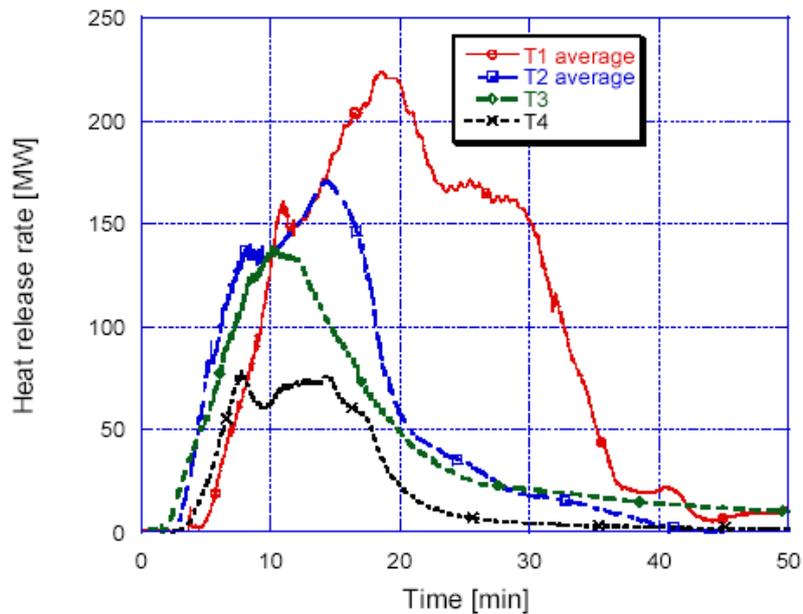


Figura 9: Curva HHR

In particolare, ci riferiamo ai valori di HRR della curva in rosso, i quali si riferiscono a una particolare struttura in acciaio in cui sono disposti pallets di legno e plastica. Tale struttura simula perfettamente la geometria di un rimorchio come si può facilmente vedere in figura 10

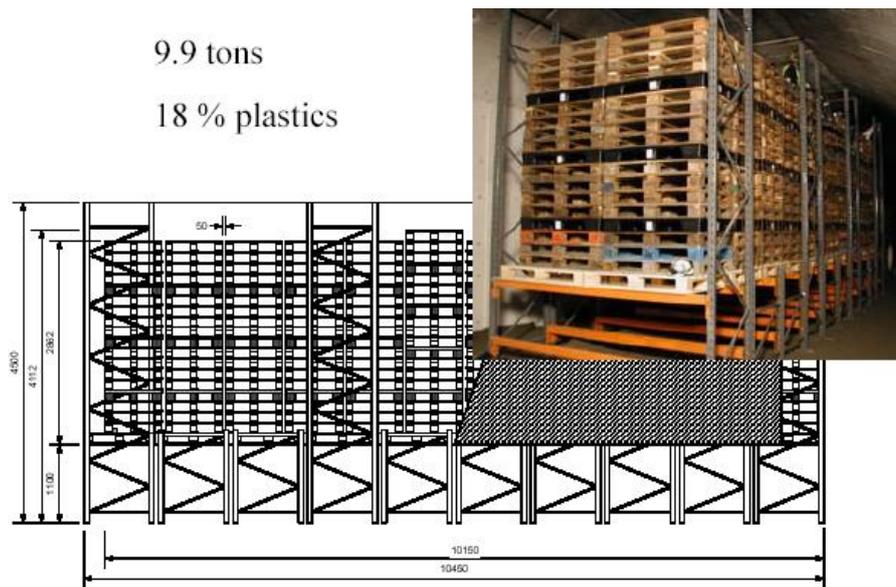


Figura 10: Struttura rimorchio

L'elevato numero di simulazioni effettuate e l'enorme mole di dati numerici e grafici, che ognuna di esse a sua volta fornisce, rende arduo una loro presentazione completa e sistematica. Si è scelto di riportare, per alcune delle simulazioni effettuate, una serie di più grafici relativi ai soli valori di temperatura nelle sezioni longitudinale e trasversale. Pur essendo disponibili un elevato numero di altri parametri visualizzabili, la scelta è caduta su questi due perché più strettamente correlabili alla stima dei danni strutturali. Le immagini presentate sono tutte delle "istantanee", relative cioè a determinati istanti di tempo.

In ognuna delle situazioni riportate è visualizzato il range delle variabili spaziali visualizzato nella forma:

$$X \rightarrow X_{\min} X_{\max}$$

$$y \rightarrow y_{\min} y_{\max}$$

$$Z \rightarrow Z_{\min} Z_{\max}$$

Il sistema di riferimento è, per tutte le gallerie prese in esame, fissato come quello in figura 8, le scale di temperatura riportate sono diverse in ognuna delle situazioni presentate, questa scelta è stata effettuata per fornire di volta in volta una rappresentazione più completa possibile.

L'impianto di ventilazione longitudinale è stato simulato con un flusso d'aria che interessa in modo uniforme tutte le sezioni trasversali della galleria. Il valore di ventilazione adottato è legato ai valori reali nella galleria (3m/s).

La direzione di ventilazione è quella crescente dell'asse x (da sinistra a destra).

Di questo caso sono illustrati i profili di temperatura a dieci, venti, trenta, quaranta e cinquanta minuti dall'inizio dell'incendio. In ognuna delle figure seguenti è stata evidenziata l'estensione, nel relativo istante, della zona invasa dai prodotti di combustione per fornire una rappresentazione, seppur qualitativa, della velocità di propagazione.

Di seguito visualizziamo l'interfaccia Airview per il caricamento dei dati:

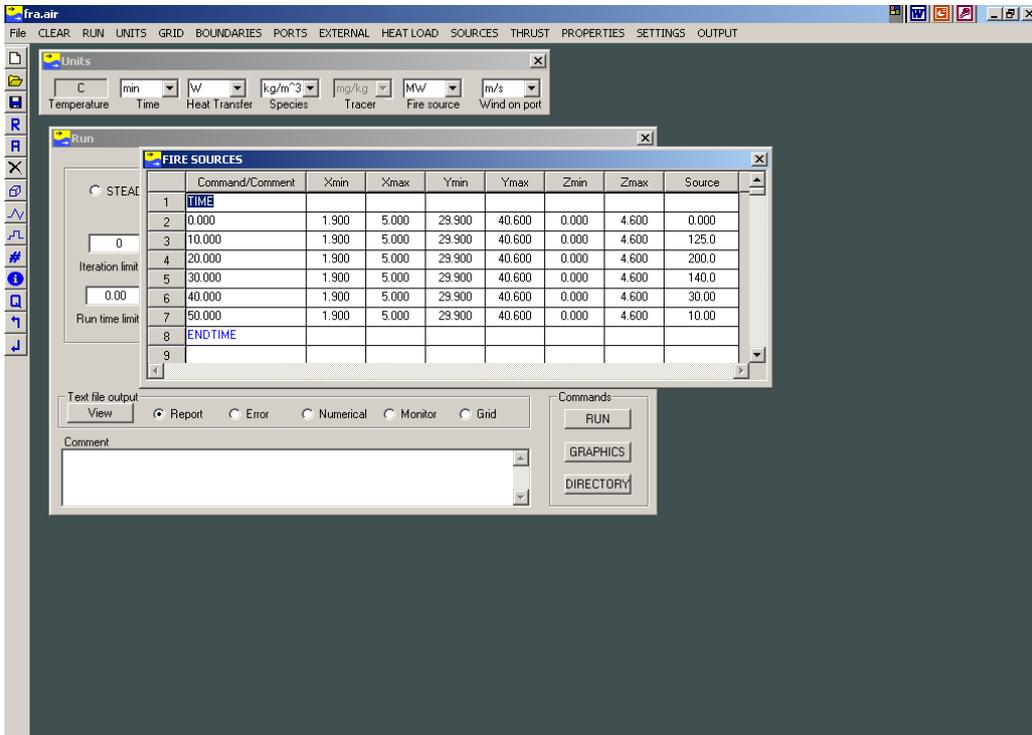


Figura 11: interfaccia dati

Per la Curva HRR non è stata fissata una potenza termica massima ma una curva di potenze termiche.

La finestra per lanciare le nostre simulazioni è la seguente

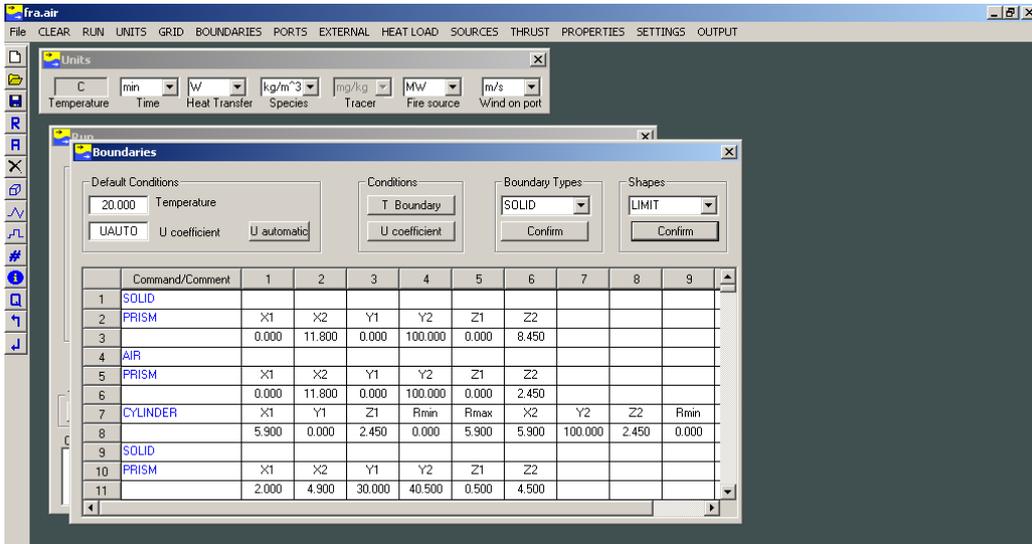


Figura 11: Finestra per lanciare la simulazione

Vengono definite le celle della galleria:

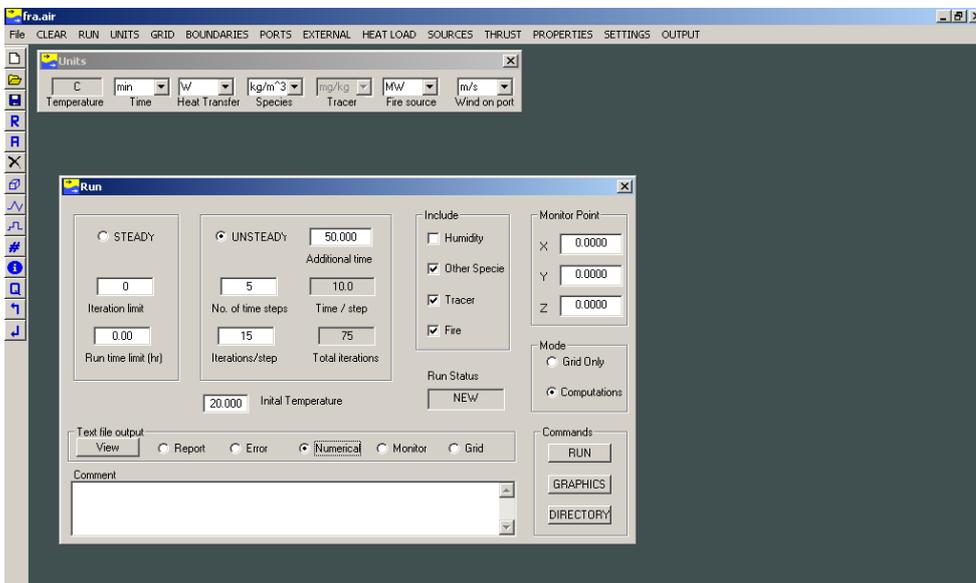


Figura 12: Definizione delle celle della galleria

Andiamo a definire gli output

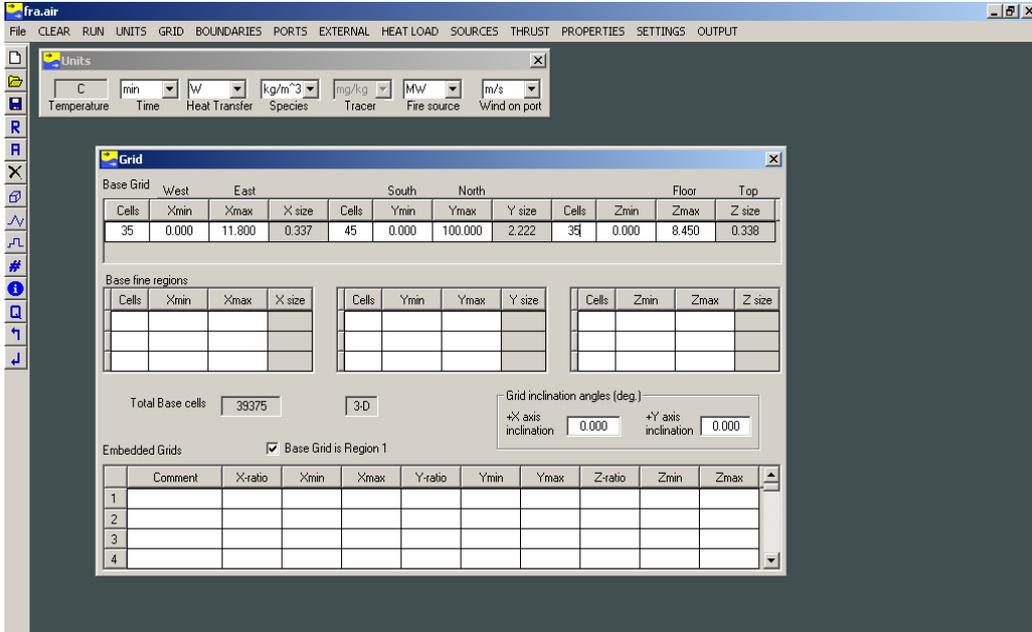


Figura 13: Definizione degli output

E le unità di misura

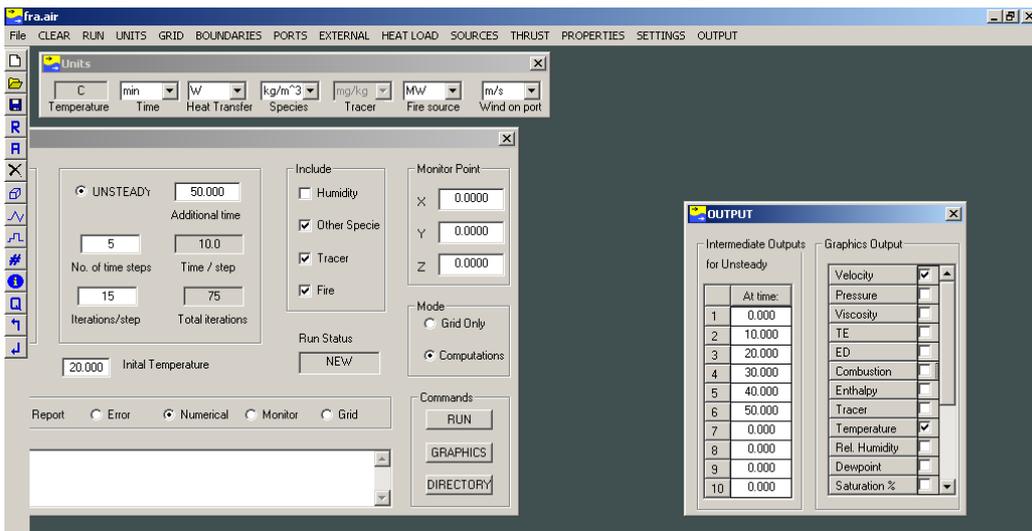


Figura 14: Definizione unità di misura

La velocità di ventilazione:

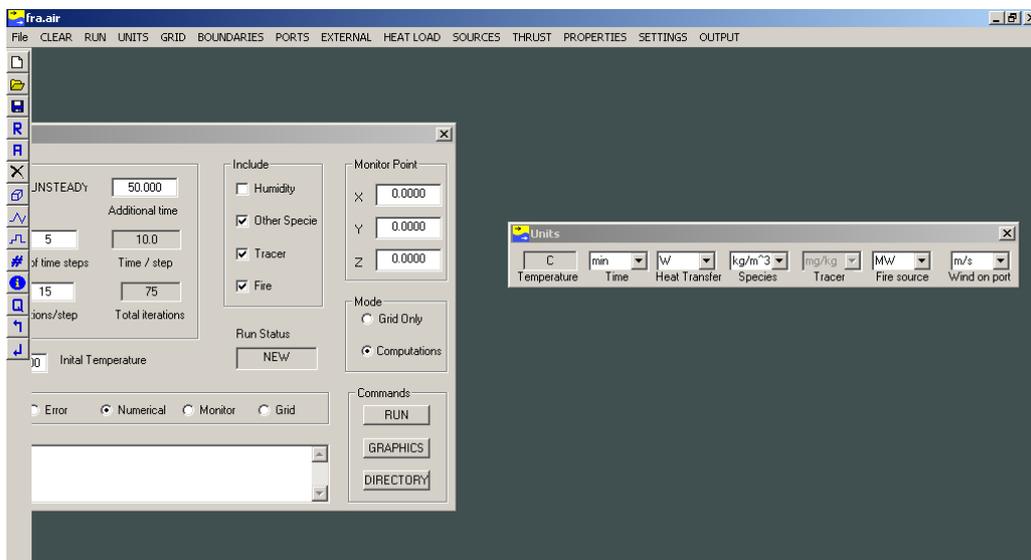


Figura 15: velocità di ventilazione

Seleziono monitor in modo da ottenere degli output in formato testuale

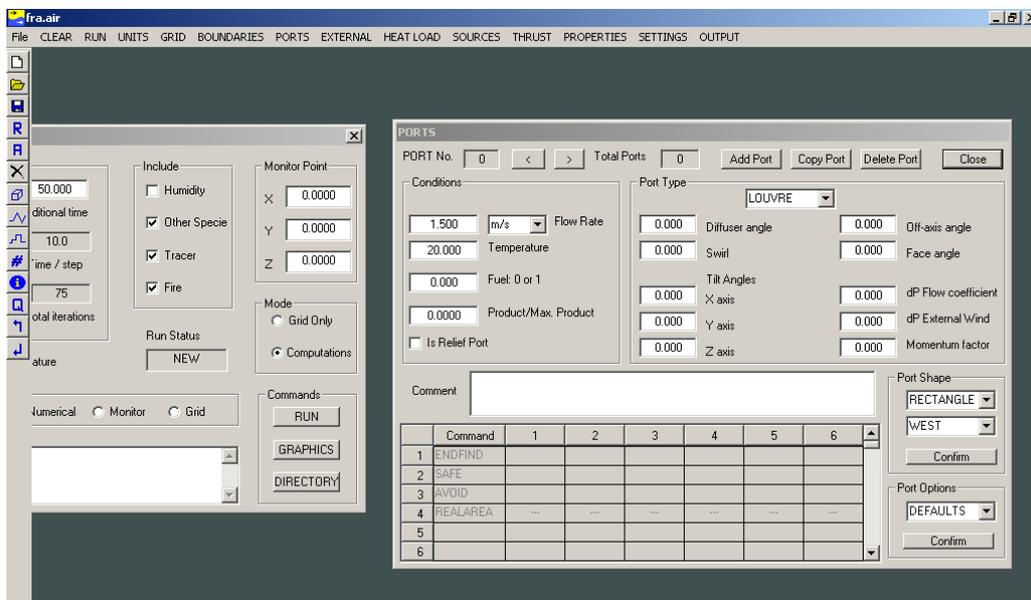


Figura 16: selezione degli output

Avvio la prima simulazione con una velocità longitudinale di 1.5 m/sec.

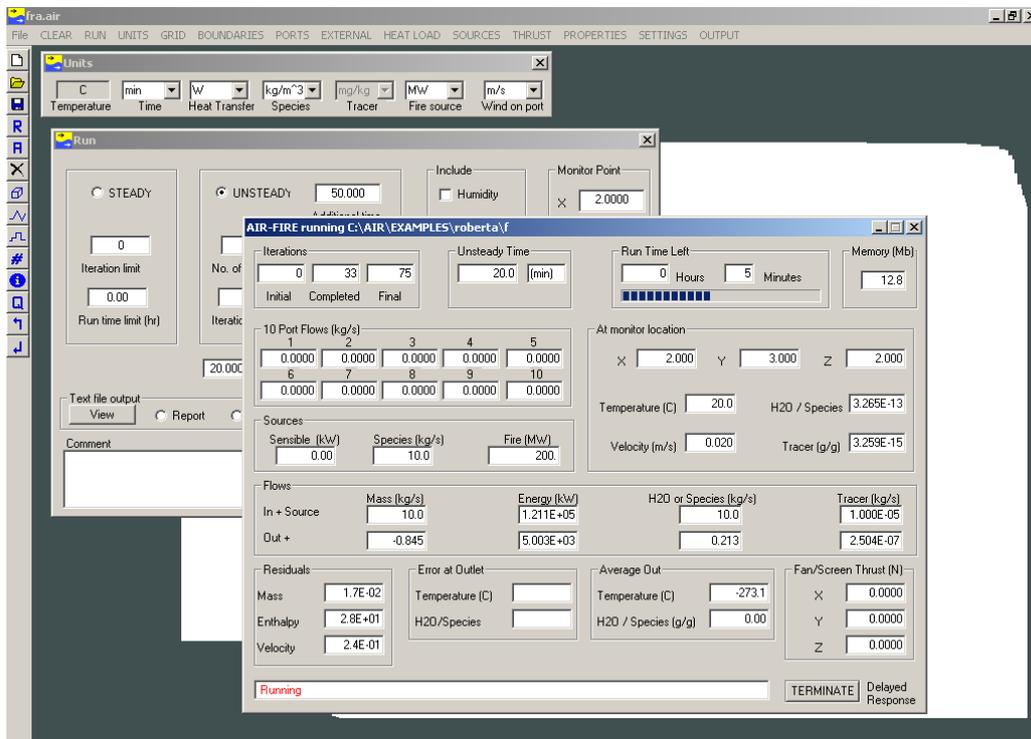
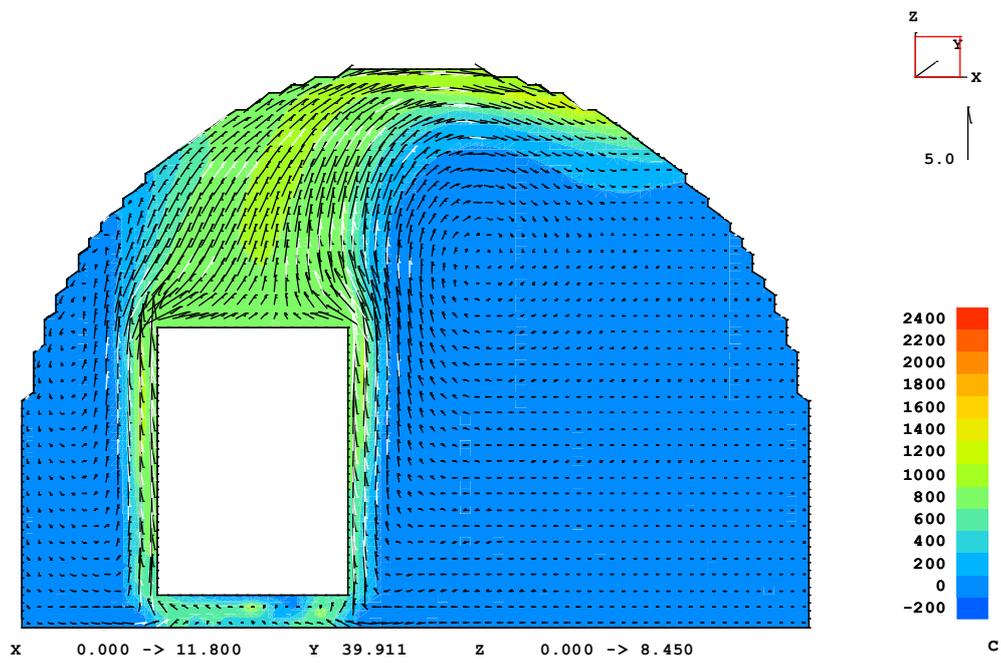


Figura 17: schermata avvio simulazione

La figura 23 è quella che suscita maggiore interesse, in quanto evidenzia come, trascorso un certo lasso di tempo, la velocità di ventilazione non è più sufficiente a contrastare il fenomeno di *backlayering*, ovvero dei prodotti di combustione in direzione contraria rispetto a quella della ventilazione.

Di seguito le simulazioni ottenute al variare del tempo:



Figural8: Profilo di temperatura trasversale dopo 10 minuti.

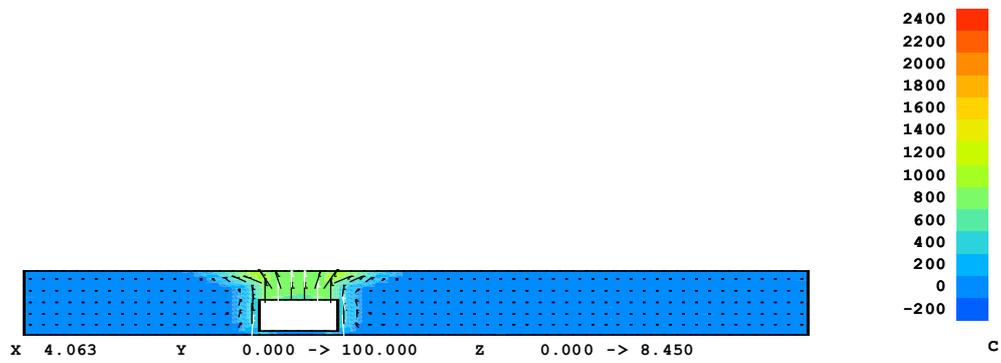


Figura 19: Profilo di temperatura longitudinale dopo 10 minuti.

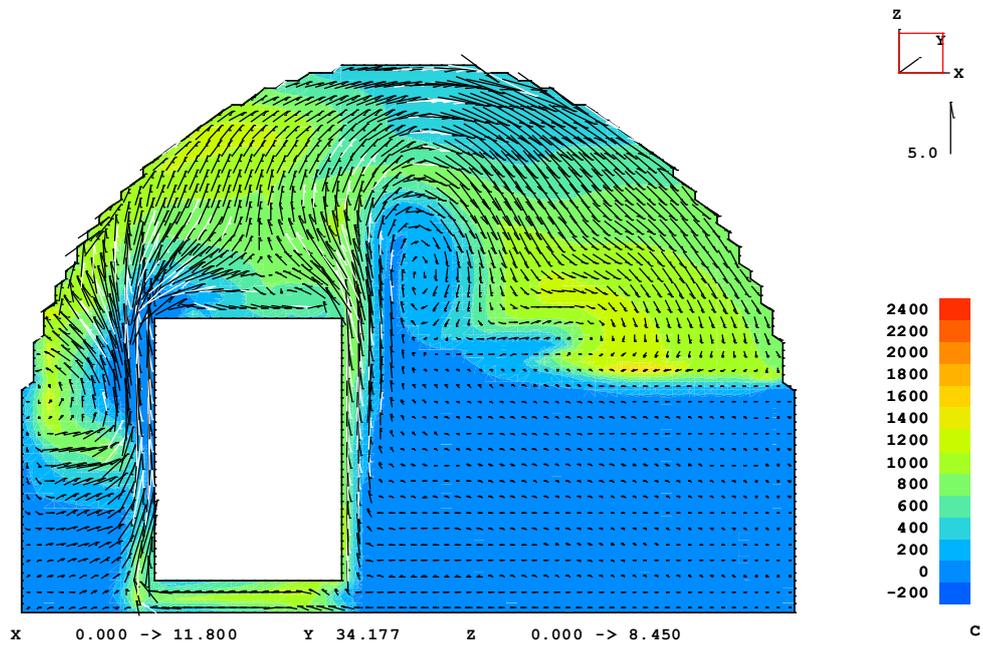


Figura 20: Profilo di temperatura trasversale dopo 20 minuti.

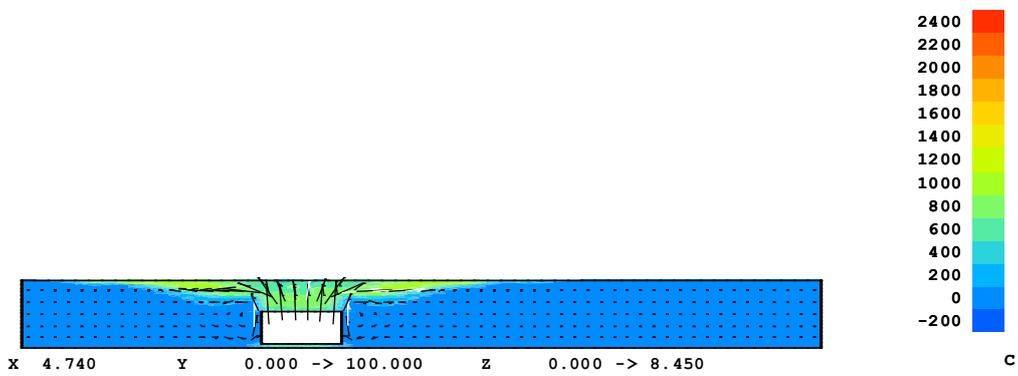


Figura 21: Profilo di temperatura longitudinale dopo 20 minuti.

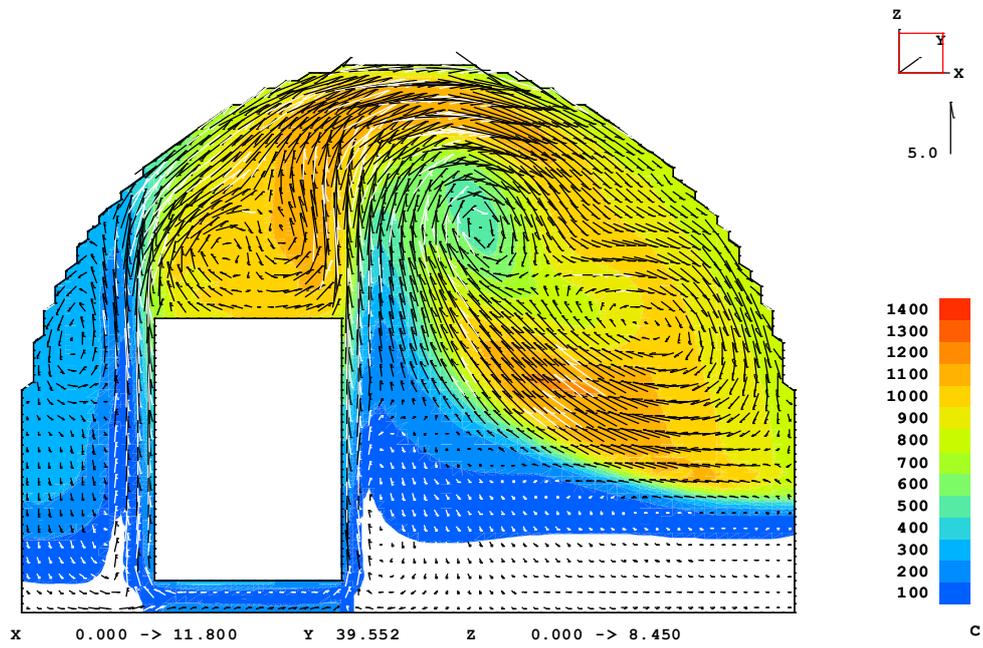


Figura 22: Profilo di temperatura trasversale dopo 30 minuti.

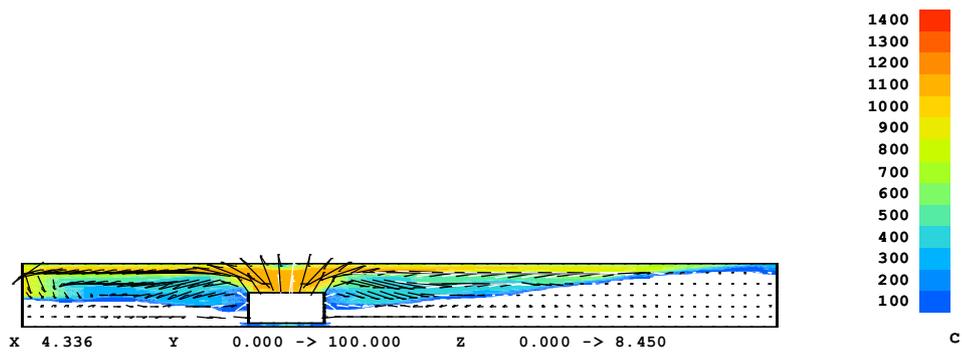


Figura 23: Profilo di temperatura longitudinale dopo 30 minuti.

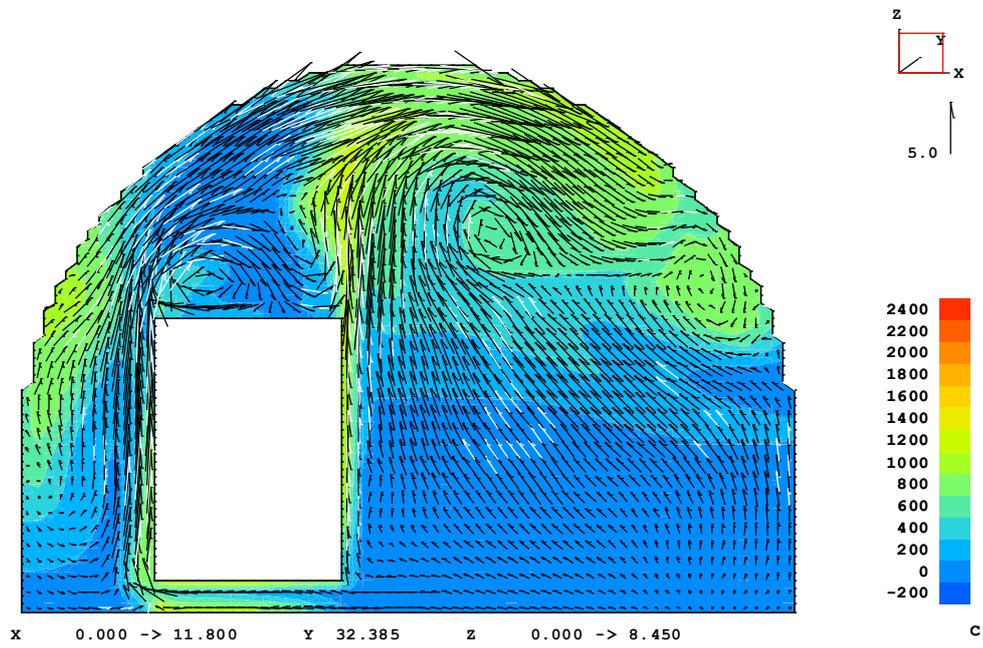


Figura 24: Profilo di temperatura trasversale dopo 40 minuti.

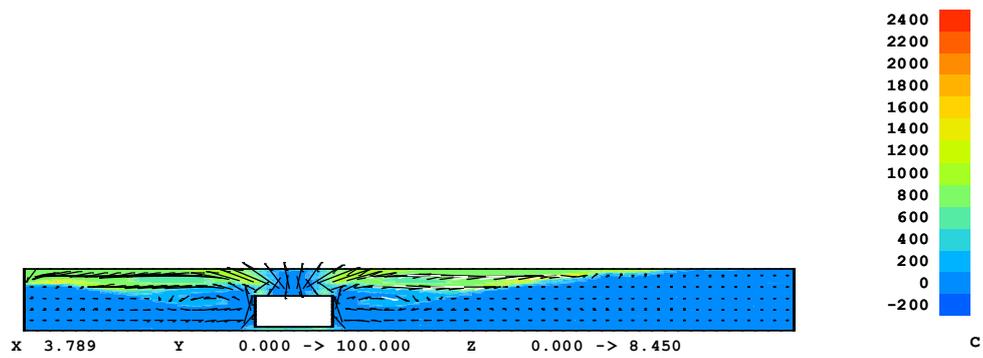


Figura 25: Profilo di temperatura longitudinale dopo 40 minuti.

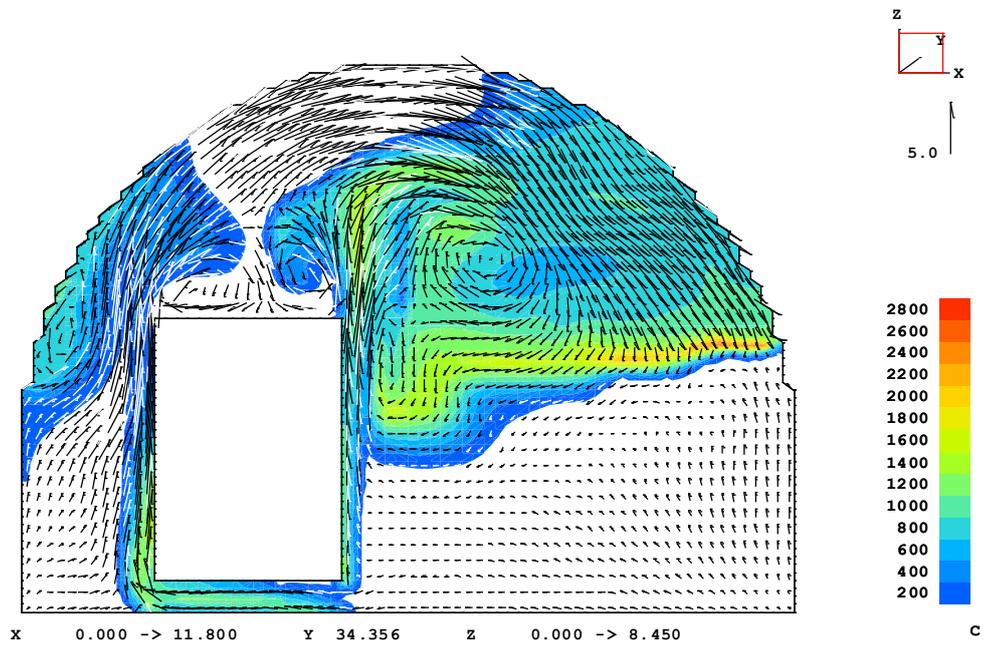


Figura 26: Profilo di temperatura trasversale dopo 50 minuti.

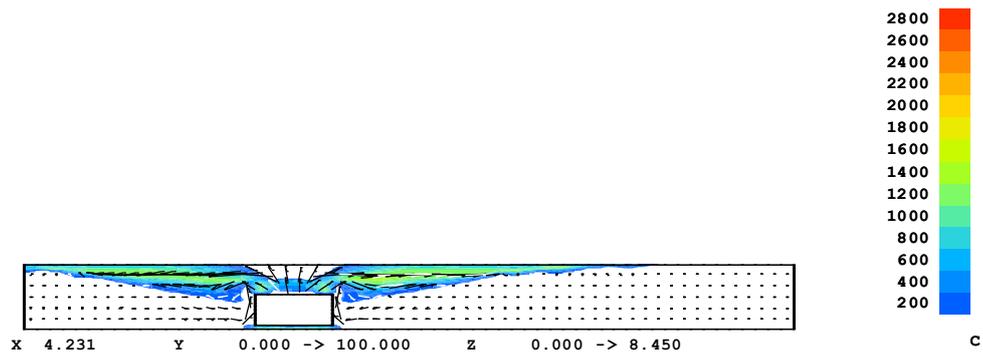


Figura 27: Profilo di temperatura longitudinale dopo 50 minuti.

Questo test è stato effettuato per dimostrare quali sono i rischi e le conseguenze degli incendi di particolari rimorchi e per valutare, successivamente, l'impianto di sicurezza più opportuno per la galleria considerata.

Gli obiettivi di questa simulazione consistono, infatti, nel dimostrare, oltre lo sviluppo dell'incendio di un rimorchio, anche l'influenza della ventilazione sui valori di HRR e della velocità del fuoco, nonché lo sviluppo di fumi e di gas tossici e infine, ma non meno importante, la temperatura massima rilevata in prossimità del soffitto (oltre i 1200 gradi centigradi).

Conoscere la temperatura massima, infatti, comporta la possibilità di poter scegliere, successivamente, qual è l'isolante più idoneo da utilizzare, che sia in grado di evitare il collasso del soffitto della galleria.

Un'attenta analisi dei risultati ottenuti può portare a delle considerevoli conclusioni: l'influenza della ventilazione non è importante come si può pensare; c'è una sostanziale probabilità che le persone intrappolate in galleria non sopravvivano, non solo per le elevate temperature generate, ma, soprattutto, per le notevoli quantità di fumi tossici che possono essere inalati.

## 4.2 Simulazioni d'incendio nel tunnel di Como

In maniera del tutto analoga è stata effettuata la valutazione all'interno del tunnel di Como. Si è ipotizzato di avere un profilo di fiamma così come evidenziato nel seguente grafico:

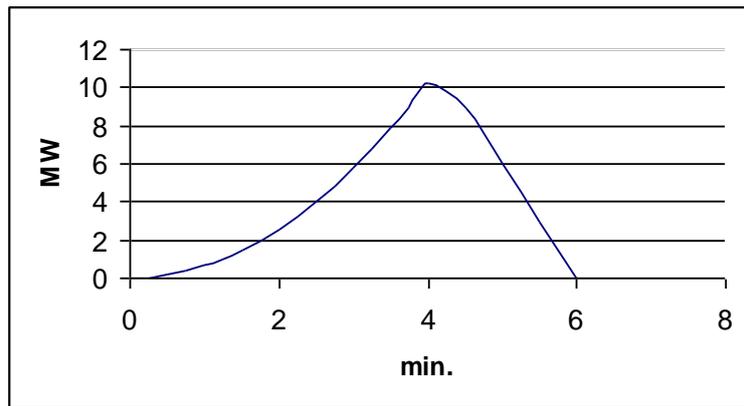


Figura 28: profilo della fiamma nel tempo

La griglia che rappresenta la galleria oggetto dello studio è la seguente:

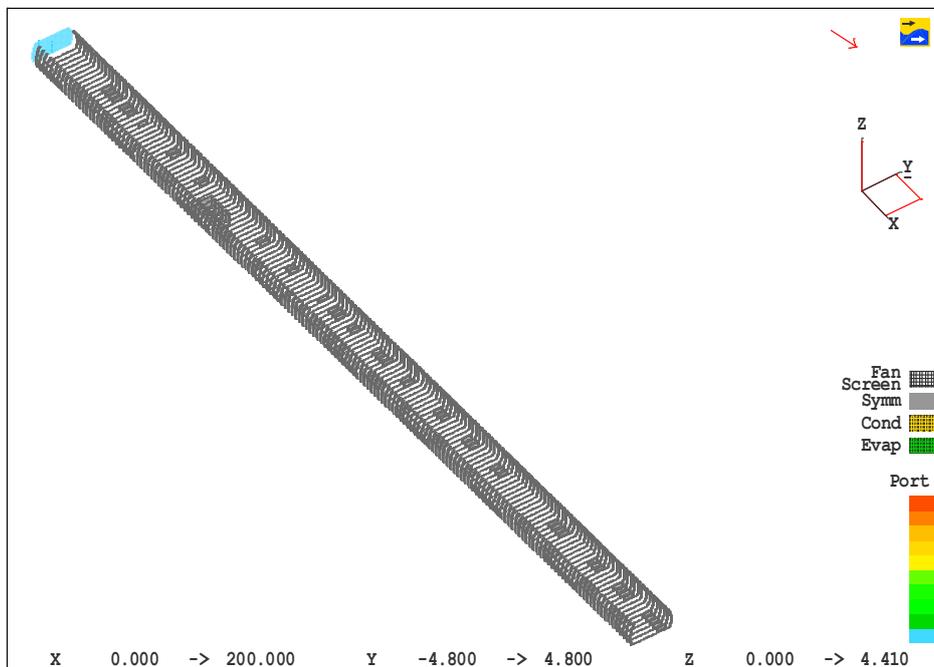


Figura 29: griglia rappresentativa del tunnel (200m).

In particolare, andiamo ad ingrandire la zona della galleria interessata dall'incendio:

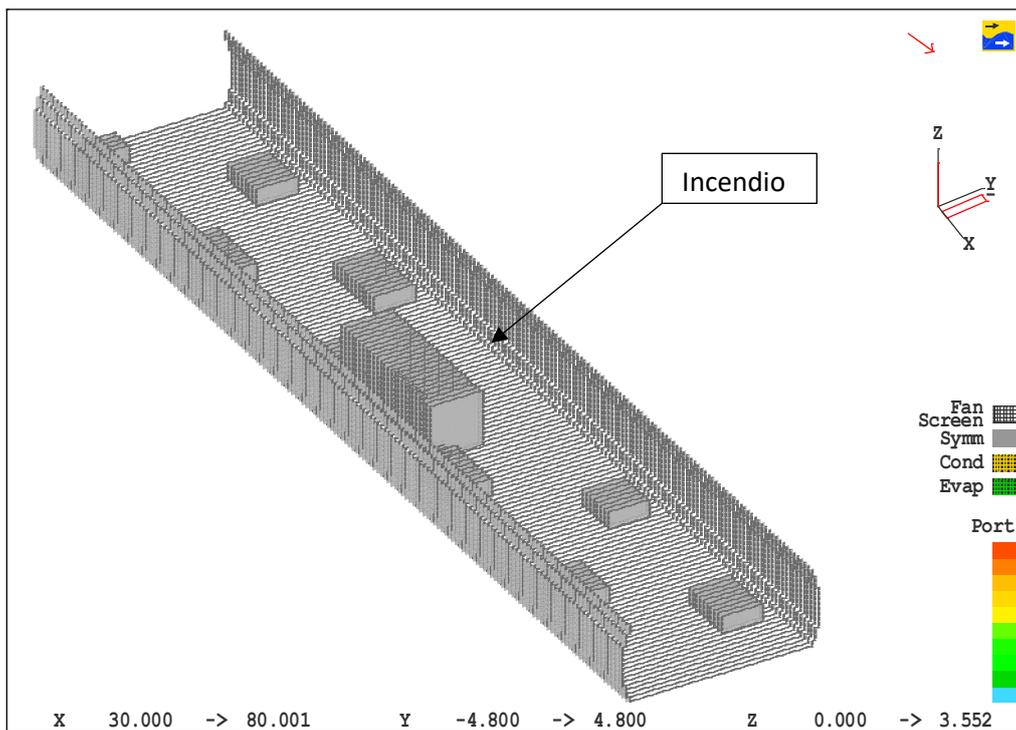


Figura 30: griglia del tunnel di Como

di cui evidenziamo la sezione di interesse in cui è rappresentato anche il camion causa dell'incendio improvviso:

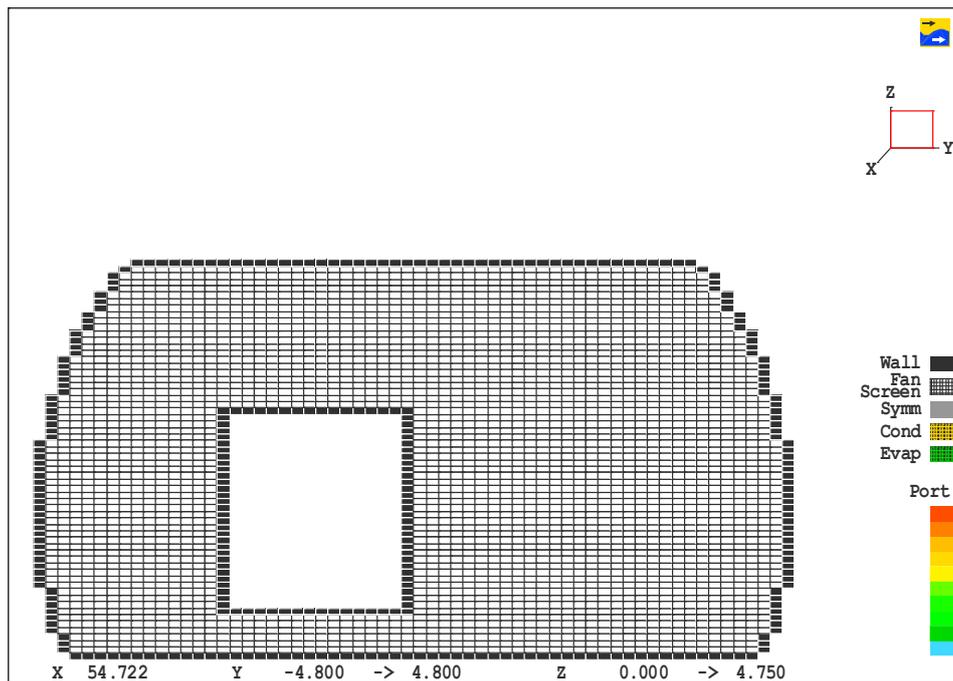


Figura 31: sezione della griglia del tunnel

La simulazione della variazione della temperatura dopo 4 secondi dallo scoppio dell'incendio all'interno del tunnel è così rappresentata in AIR:

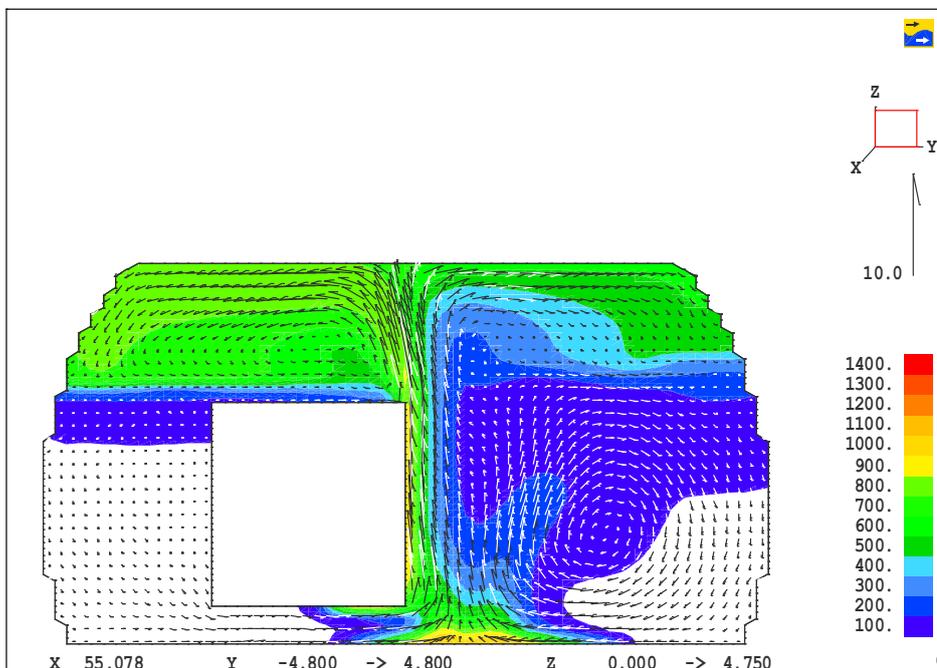


Figura 32: modellazione temperatura e velocità, sezione incendio

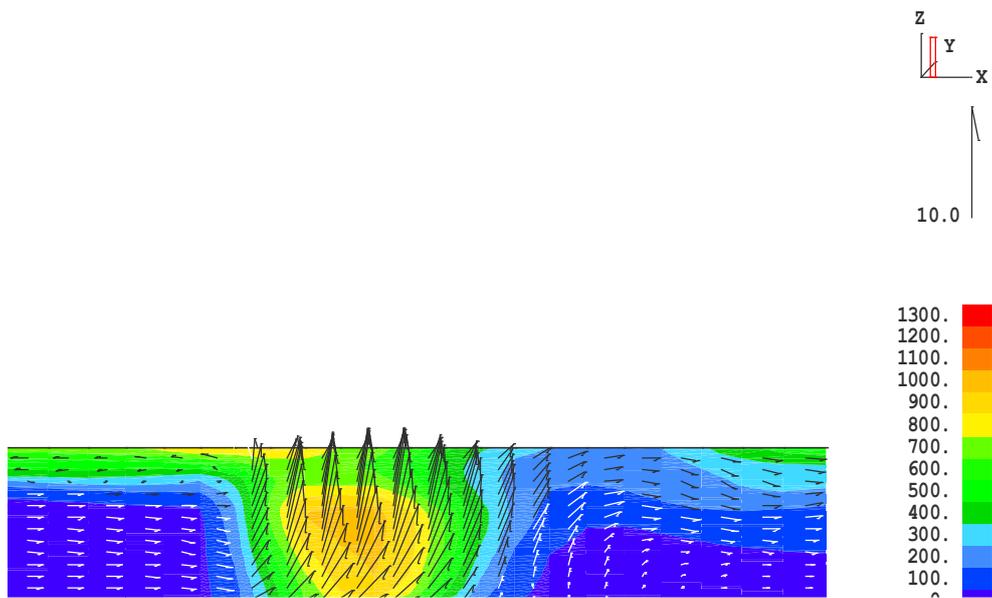


Figura 33: modellazione temperatura e velocità, longitudinale

Qui viene visualizzata la dispersione dei fumi in funzione della temperatura sempre dopo 4 minuti dall'inizio dall'incendio

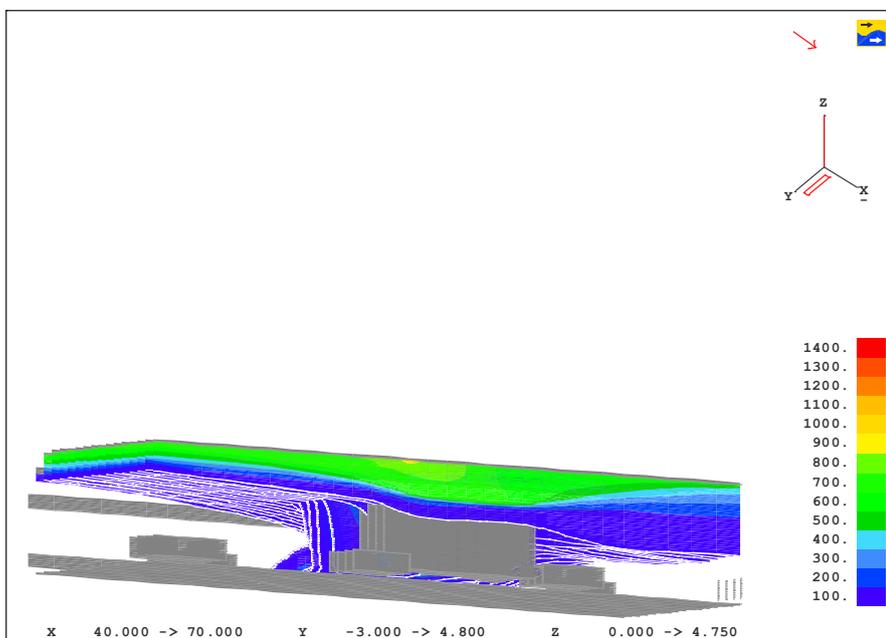


Figura 34: modellazione temperatura e velocità

Ottenendo la seguente dispersione dei fumi nella sezione di scoppio dell'incendio sia nella sezione di scoppio che in tutta la galleria:

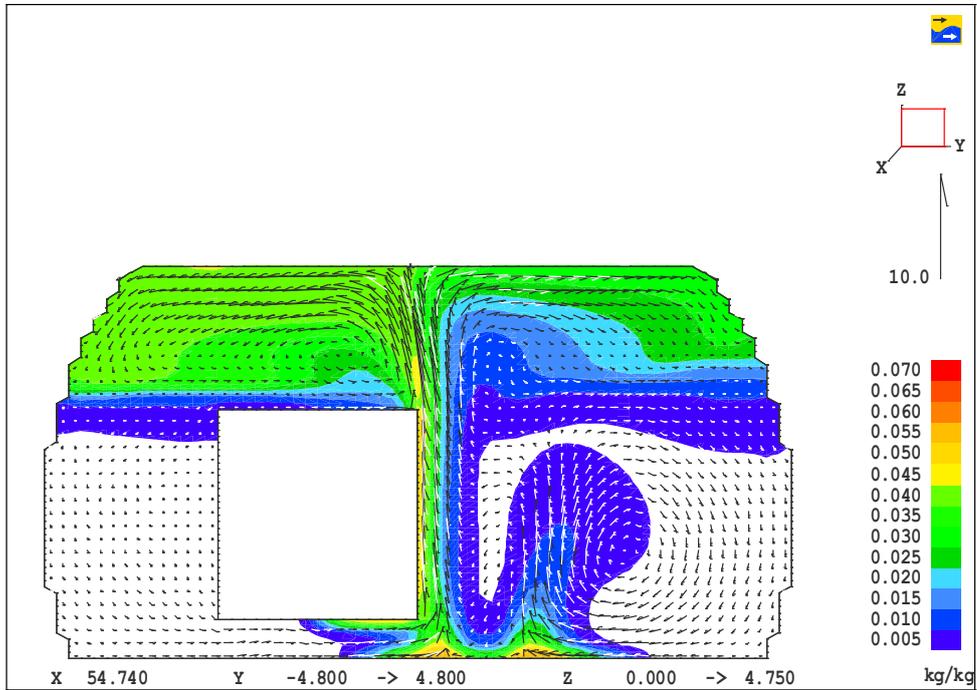


Figura 35: fumi prodotti dopo 4 minuti dell'innescio

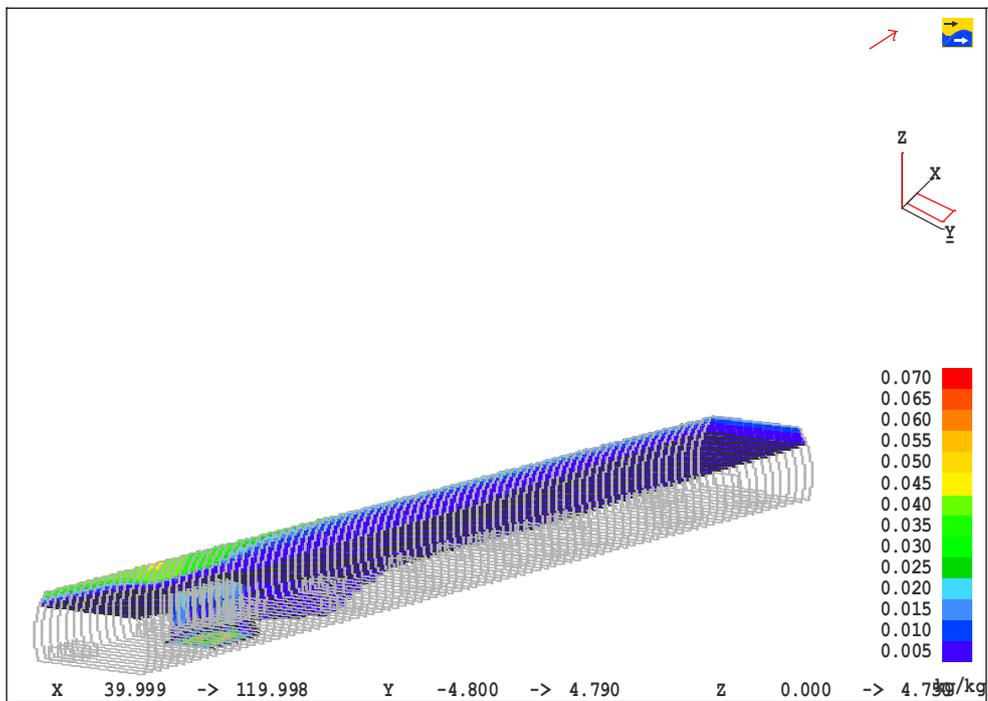


Figura 36: fumi prodotti dopo 4 minuti dell'innescio in tutta la galleria

Come si può vedere, all'interno della galleria la quantità di flusso d'aria che entra da destra è predominante mantenendo un profilo di velocità pari a quella iniziale per tutta la lunghezza della galleria in quanto i gas di combustione hanno una velocità troppo bassa per influenzare i profili di moto all'interno della galleria. Globalmente si osserva una buona capacità della simulazione nel fornire risultati attendibili, ed osserviamo nelle prove svolte andamenti molto simili. Nei grafici relativi tale approccio viene riportato l'andamento dello strato di fumo al variare del tempo dopo l'innescò dell'incendio. L'andamento del fumo è espresso tramite la distanza, rispetto la pool fire, del primo punto lungo il tunnel in prossimità del soffitto in cui si osserva presenza di fumo.

Si è anche valutato l'andamento della dispersione dei fumi al variare del grado di congestione del tunnel, funzione del numero e delle dimensioni degli ostacoli presenti.

### 4.3 Simulazioni d'incendio di una biblioteca

Sempre considerando ambiente confinati un'altra ipotesi di simulazione è stata effettuata considerando una biblioteca, sviluppata su due piani, di cui le grandezze geometriche sono le seguenti:

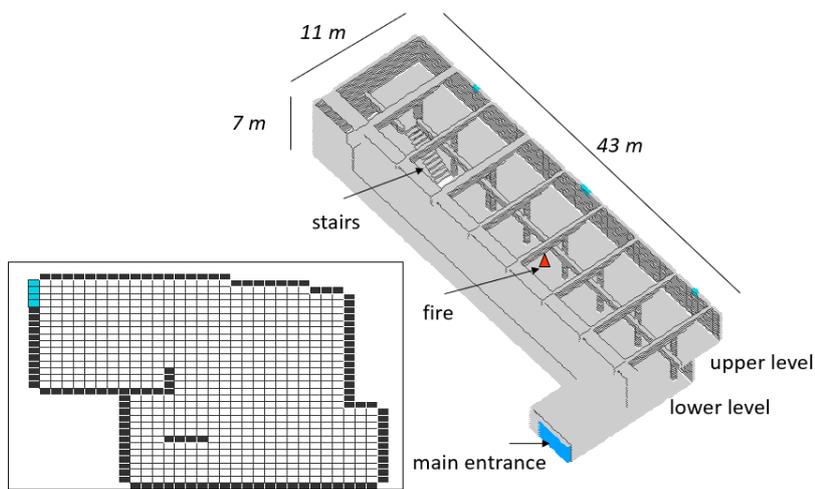


Figura 37: misure biblioteca

Considerando la struttura della biblioteca e l'elevata presenza di materiale altamente infiammabile, si suppongono una velocità molto elevata per lo sviluppo dell'incendio e che tale incendio, di circa 1 MW sia corrispondente ad una velocità di combustione di libri di 3kg/min.

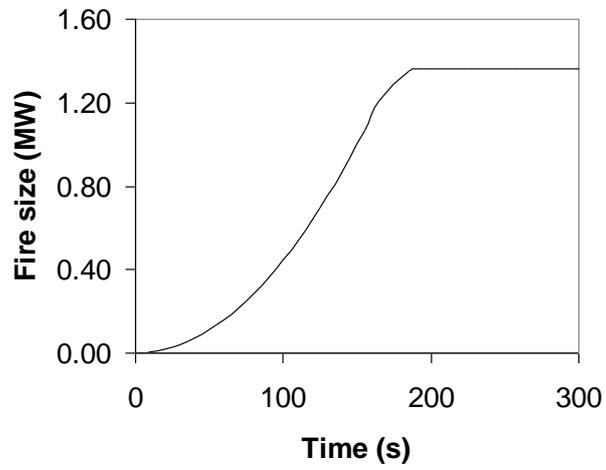


Figura 38: velocità sviluppo incendio

La valutazione della quantità di CO e di specie tossiche sono state ottenute considerando il test chambres:

$$Y_{CO} = m_{CO} / m_{prodotti}$$

Ottenendo i seguenti valori:

Fuel	Y <sub>co</sub>
Polyvinylchloride	0.063
Nylon	0.038
Polypropylene	0.024
Polyethylene	0.024
Pine	0.005
Red Oak	0.004

Sempre utilizzando il test di chambres è stata effettuata la valutazione della quantità di fuliggine e visibilità dove indicata con  $D$  la densità ottica avremo:

$$D_m = D / m_{prodotti} / V$$

Dove i dati ottenuti sono i seguenti:

Fuel	$D_m$ (m <sup>2</sup> /g)
Polyvinylchloride	0.4
Nylon	0.23
Polypropylene	0.24
Polyethylene	0.23
Pine	0.038
Red Oak	0.037

La visibilità è una funzione inversamente proporzionale col tempo, essa diminuirà con un andamento descritto dalla seguente equazione:

$$S_m = 1.3 / (D_m * c_{prodotti})$$

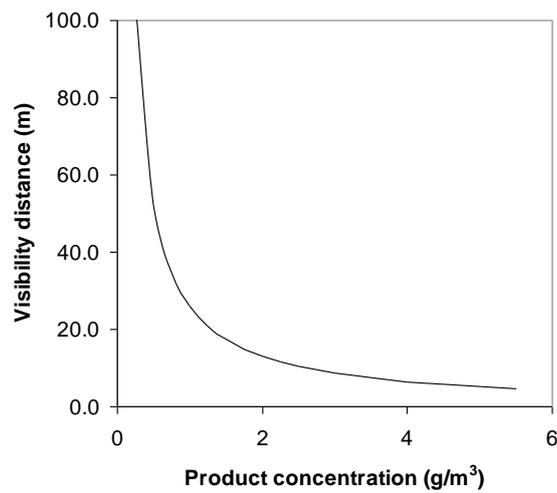


Figura 39: variazione visibilità

È stata considerata anche la valutazione del rischio da sostanze tossiche:

CO	0.6 – 0.8 %	Inabilità in 5 min
CO	1.20 – 1.6%	Morte in 5 min
CO	0.14 – 0.17 %	Inabilità in 30 min
CO	0.25 – 0.40 %	Morte in 30 min

Le simulazioni delle temperatura e della velocità di dispersione dei fumi ottenute sempre utilizzando il software AIR sono rappresentate nelle seguenti illustrazioni:

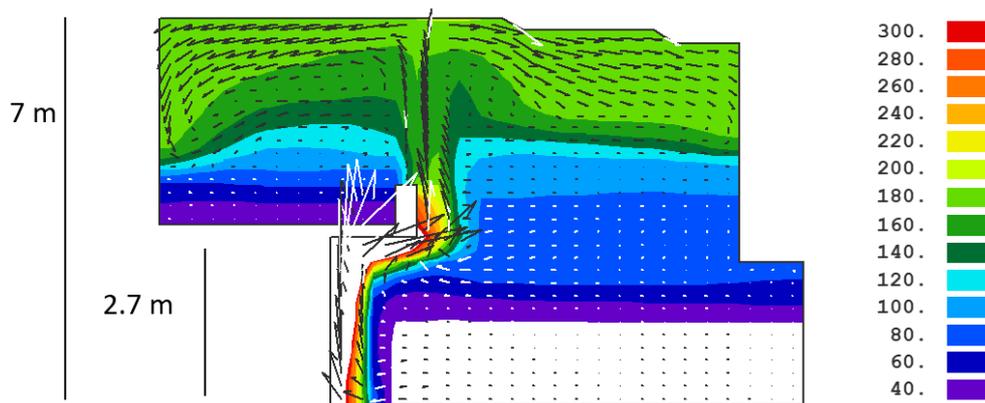


Figura 40: T e v dopo 5 min dallo sviluppo incendio

Dove è rappresentata la distribuzione della temperatura e della velocità dopo 5 minuti dall'innesco dell'incendio.

E' stata messa a confronto la simulazione ottenuta in caso di aria statica con quella in cui abbiamo la presenza di una ventilazione, ottenendo, sempre dopo 5 minuti dall'innesco dell'incendio le seguenti differenze:

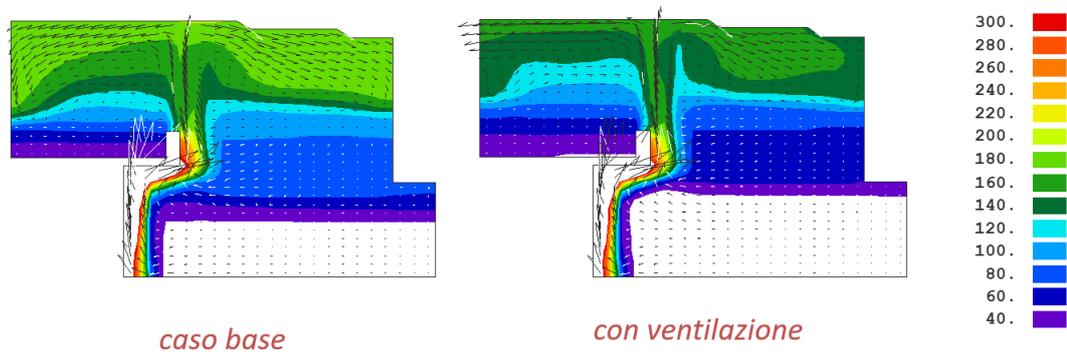


Figura 41: T e v dopo 5 min dallo sviluppo incendio

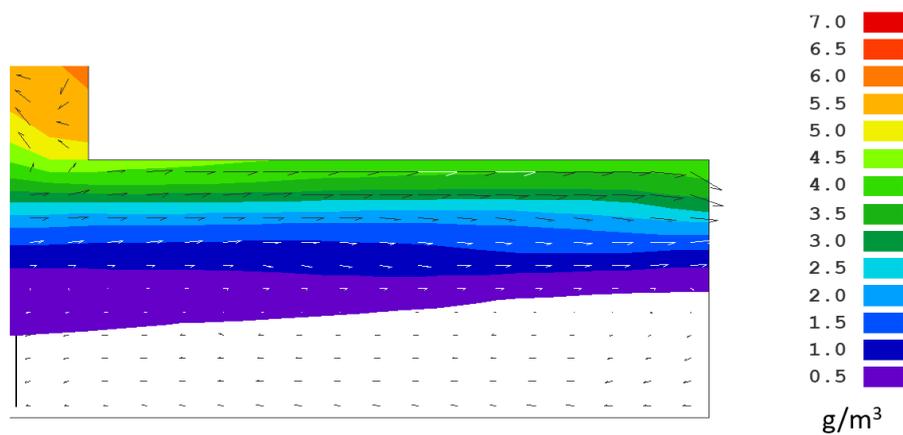


Figura 42: T e v dopo 5 min dallo sviluppo incendio ingresso biblioteca

La distribuzione dei prodotti all'ingresso dopo 5 minuti dall'innescio dell'incendio, che poi mettiamo a confronto sia nel caso in cui ci sia la ventilazione che non ci sia:

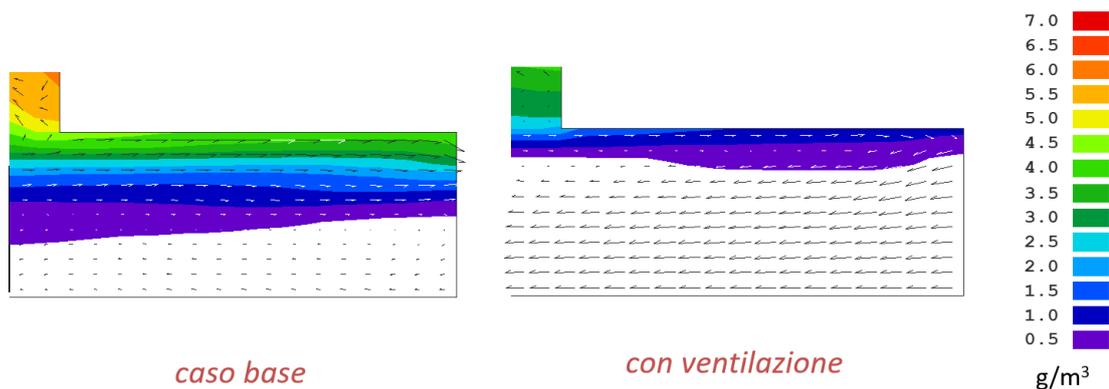


Figura 43: differenza di T e v dopo 5 min nei due scenari

Andando ad visualizzare l'intera struttura considerata, sempre dopo 5 minuti dall'innesco, otteniamo la seguente distribuzione della concentrazione dei prodotti. Si nota come i prodotti a temperatura maggiore tendano a spostarsi più velocemente verso le zone che presentano un'altezza maggiore a differenza delle sostanze che, con temperatura inferiore, tendono ad occupare le zone più a contatto con la pavimentazione:

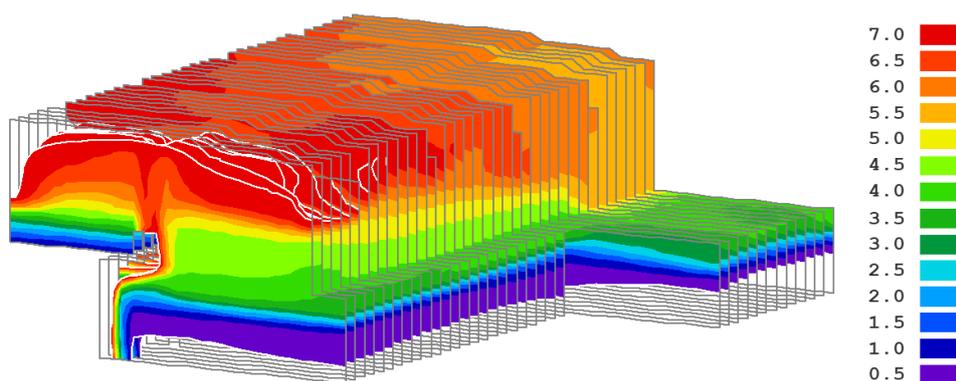


Figura 44: distribuzione sull'intera area di T e v dopo 5 min nei due scenari

## Capitolo 5

### *Conclusioni*

Il raggiungimento della sicurezza in condizioni di incendio richiede un approccio olistico: i settori disciplinari utili alla descrizione del fenomeno dell'incendio sono numerosi e differenti. Nell'ambito del nostro percorso di studi sono state analizzate metodologie disponibili per la caratterizzazione dell'incendio in ambienti chiusi, soffermandoci su scenari d'incendio con un maggiore rischio. Le informazioni sulla geometria dei compartimenti, dei materiali e delle sostanze combustibili consentono di modellare l'incendio con modelli CFD. Tale approccio permette di descrivere le prestazioni reali delle strutture in modo da poter effettuare in fase di progettazione degli interventi mirati per incrementare i requisiti di sicurezza richiesti. Questo procedimento può essere valido sia per strutture già esistenti che per strutture di nuova progettazione.

Le simulazioni di cui ci siamo occupati mostrano come si possa supportare il dimensionamento di sistemi anche complessi, come quelli antincendio, mediante analisi comparative e sulla base di opportune ipotesi. L'obiettivo di tali simulazioni è stato quello di prevedere lo sviluppo e la propagazione dei fumi in un tratto di strutture di ambienti confinati.

Nel considerare le conseguenze degli incendi assumono fondamentale importanza i sistemi di ventilazione, che sono il principale strumento per permettere l'esodo e l'eventuale intervento delle squadre di soccorso.

Per l'ottimizzazione mediante l'impiego dei codici dei tipici problemi dell'antincendio occorre effettuare determinate ipotesi semplificative, nonché definire coerentemente modelli con opportuni criteri di sicurezza da perseguire. Infatti, è la definizione dei criteri di sicurezza che consente il confronto delle

diverse soluzioni per permettere un'analisi comparativa in grado di supportare la progettazione antincendio. La messa a punto dei valori di soglia e dei relativi tempi di esposizione, oltre i quali non è più garantita la permanenza in sicurezza nell'ambiente, è ancora in fase di approfondimento e definizione a livello globale, e dovrebbe avere come obiettivo quello di fornire dei valori oggettivi, universalmente riconosciuti, a cui potersi riferire.

L'attività ha riguardato innanzitutto la definizione e l'ottimizzazione della griglia di calcolo, dei parametri di simulazione e dei sotto modelli impiegati, con l'obiettivo di prevedere con sufficiente accuratezza lo sviluppo e la propagazione dei fumi, considerando diversi scenari, tutti concernenti un probabile incendio in ambienti confinati. Le principali criticità riscontrate per l'esecuzione delle simulazioni oggetto di questo lavoro sono principalmente inerenti alla definizione delle corrette condizioni iniziali e al contorno del dominio considerato. L'obiettivo è quello di sfruttare queste simulazioni per migliorare la pianificazione e l'attuazione di strumenti atti ad aumentare il livello di sicurezza, ciò deve portare all'attuazione di specifici piani di miglioramento in cui si pone al centro la salvaguardia della vita umana. Non ci si deve limitare ad analizzare gli incidenti solo dopo che sono accaduti, bensì si deve agire in una logica che sia soprattutto preventiva ed in cui tutti gli attori coinvolti operano con l'intento di accrescere e migliorare il livello di sicurezza. Per una corretta valutazione delle condizioni di rischio e per la sopravvivenza sia degli utenti coinvolti nell'incidente durante l'evacuazione della galleria sia delle squadre di soccorso durante il loro intervento, i risultati delle simulazioni dovranno essere analizzati insieme a modelli di esodo che tengano conto delle condizioni di fuga lungo il percorso di evacuazione. In tal modo le condizioni di sicurezza potranno essere determinate in base ai valori assunti dai parametri di rischio lungo la galleria e al tempo di esposizione dei soggetti a ciascun elemento di rischio. Questi obiettivi in via sperimentale sono perseguibili grazie ai codici fluidodinamici che consentono di ottenere meshature che riproducono impianti e ambienti

fedelmente e di utilizzare modelli più accurati e raffinati solo dove necessario senza appesantire notevolmente i tempi di calcolo. La forte dipendenza da modelli di calcolo e software di modellazione non deve essere fuorviante, essi devono impiegati come supporto per la riuscita di un processo più complesso in cui la capacità d'analisi, il ragionamento, le competenze e il buon senso non devono essere rimpiazzati.

## *Bibliografia*

1. Corpo nazionale vigili del fuoco, Chimica e fisica dell'incendio. In: Ministero dell'interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile (2016);
2. Favia P., Simulazione di un incendio in galleria con il software FDS, In: Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale (2013);
3. Center for Simulation of Accidental Fires and Explosions - DOE. (n.d.). Retrieved May 29, 2015, from <http://www.uintah.utah.edu>;
4. Skjold, T., Pedersen, H. H., Bernard, L., Middha, P., Narasimhamurthy, V. D., Landvik, T., Pesch, L. (2013). A matter of life and death: Validating, qualifying and documenting models for simulating flow-related accident scenarios in the process industry. *Chemical Engineering Transactions*, 31, 187–192. <http://doi.org/10.3303/CET1331032>;
5. Center for Chemical Process Safety (CCPS), Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE and Flash Fire Hazards, AIChE, second edition, 2010;
6. Lea, C.J.(Fire And Explosion Group, H., & Ledin, H.S. (Fire And Explosion Group, H. (2002). A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modelling;
7. Hu, Z., & Trouve, A. (2008). Numerical simulation of explosive combustion following ignition of a fuel vapor cloud. *Fire Safety Science*, 1055–1066. <http://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-1055>;
8. T. Poinot ed altri, Simulation tools for 3D reacting flows. <https://www.princeton.edu/cefr/Files/2013%20Lecture%20Notes/Poinot/5-Codes-DNS-LES-RANS.pptx.pdf>;
9. Zalosh, R. (Firexplo). (2008). Explosion Venting Data and Modeling Research Project [https://www.nfpa.org/Assets/files/AboutTheCodes/68/Firexplo\\_Explosion\\_Venting\\_Report.pdf](https://www.nfpa.org/Assets/files/AboutTheCodes/68/Firexplo_Explosion_Venting_Report.pdf);

10. Takahashi, K., & Watanabe, K. (2010). Advanced Numerical Simulation of Gas Explosion for Assessing the Safety of Oil and Gas Plant. Numerical Simulations - Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics, (Figure 1). <http://doi.org/10.5772/13305>;
11. Hjertager B., Solberg T. (1999) A review of computational fluid dynamics (CFD) modeling of gas explosions. Prevention of hazardous fires and explosions, pp. 77-90;
12. Marigo, Rischio atmosfere esplosive, Classificazione Valutazione Prevenzione Protezione, IPSOA, 2013;
13. ENV 1991-2-2, Eurocode 1 Basis of design and actions on structures Part Actions on structures exposed to fire. UE;
14. CEC Agreement upon Natural Fire Safety Concept. UE;
15. D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics. USA;
16. Università di Liegi, OZONE Proposta di Modello Simulazione Incendio ad Una Zona. UE;
17. NIST, An update guide for HAZARD I version 1.2. USA;
18. D'Anna, A: Simulazione della formazione di inquinanti nella combustione di gas scaricati in torce industriali – Analisi modellistica di torce industriali alimentate con idrocarburi gassosi, giugno 2005;
19. D'Anna A., Comodo M., Violi S., Allouis, C., Kent, J.: Nanorganic Carbon and Soot In Turbulent non-Premixed Ethylene Flames, august 2006;
20. Technip Italy, Valutazione preliminare della qualità degli scarichi dell'impianto di etilene, aprile 2005;
21. Barnard J.A., Bradley G.N., Flame and combustion, Chapman-Hall, New York, 1985;
22. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/running-applications-parallel/>;
23. G. Yeoh & K. Yuen, Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering. Cambridge University. Elsevier. 2008;
24. Yu H.Z., Lee J.L, and H.C. Kung (1994) Suppression of Rack-Storage Fires by Water. Fire Safety Science– Proceedings of the Fourth

- International Symposium, International Association For Fire Safety Science, (73),901-912;
25. H. Werner and H. Wengle (1991), Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plate channel. In 8th Symposium on Turbulent Shear Flows, 155–168. 36;
  26. Jiyuan et al. (2018). Computational Fluid Dynamics (Third Edition), Chapter 4: CFD Mesh Generation: A Practical Guideline. Butterworth-Heinemann;
  27. H. K. Versteeg et al.(2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Prentice Hall;
  28. J. Ferziger et al. (2002). Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag;
  29. T. Jiyuan et al. (2018). Computational Fluid Dynamics (Third Edition), Chapter 4: CFD Mesh Generation: A Practical Guideline. Butterworth-Heinemann;
  30. F. R. Menter (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal, vol. 32, no 8., pp. 1598-1605;
  31. J. Ferziger et al. (2002). Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag;
  32. D. P. Nolan (2011). Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities. Gulf Professional Publishing