

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA,  
AMBIENTALE E DEI MATERIALI**

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CHIMICA E DI PROCESSO*

**TESI DI LAUREA**

in

Sicurezza Occupazionale e Igiene Industriale

**Analisi della potenza termica rilasciata da un incendio di materiale plastico  
attraverso l'utilizzo di modelli di fluidodinamica computazionale**

CANDIDATO:

Linda van Zutphen

RELATORE:

Ing. Giordano Emrys Scarponi

CORRELATORE:

Ing. Matteo Pugnalin

Anno Accademico 2021/2022

Sessione III

## ABSTRACT

Il presente lavoro di tesi si focalizza sulla possibilità di modellare la curva di potenza termica rilasciata (HRR – *Heat Release Rate*) in un incendio reale attraverso la simulazione CFD (*Computational Fluid Dynamics*), in particolare utilizzando il software FDS (*Fire Dynamics Simulator*). Nello specifico è analizzato un incendio di merce di materiale plastico da depositare all'interno di un magazzino, in cui la curva HRR è stata ricavata dai dati sperimentali di un *fire-test* seguendo l'approccio proposto dalla normativa NFPA 921. Tale norma propone di stimare la curva HRR attraverso una relazione semplificata che non tiene conto di alcuni fenomeni chimici e fisici che governano lo sviluppo dell'incendio; quindi, l'obiettivo della presente tesi è di ottenere un approccio più avanzato per la determinazione della curva HRR, da poter proporre per le simulazioni di studio della *Fire Safety Engineering*. Per realizzare la simulazione sono analizzati i vari modelli disponibili per la riproduzione dei fenomeni all'interno del software, confrontandoli tramite le curve HRR. L'impiego di un software CFD per la determinazione della curva di potenza termica rilasciata è risultato essere un approccio possibile; tuttavia, non è stata raggiunta l'indipendenza dei risultati dalla griglia di calcolo per la mancanza di risorse computazionali; pertanto allo stato attuale questo approccio è difficilmente applicabile in maniera ingegneristica ma in un futuro, ipotizzando di avere disponibili risorse di calcolo con potenze sempre maggiori, potrà essere utilizzato.

# INDICE

INTRODUZIONE .....	6
1. L' INCENDIO.....	9
1.1 PROCESSO DI COMBUSTIONE.....	9
1.2 COMBUSTIBILI.....	11
1.3 PRODOTTI DI COMBUSTIONE .....	12
1.3.1 GAS DI COMBUSTIONE .....	12
1.3.2 CALORE .....	12
1.3.3 FIAMME.....	12
1.3.4 FUMI .....	13
1.4 TIPOLOGIE DI INCENDIO .....	14
1.5 FASI DI SVILUPPO.....	15
1.6 POTENZA TERMICA RILASCIATA DA UN INCENDIO .....	19
1.7 PROCESSO DI PIROLISI .....	23
2. MODELLI DI CALCOLO PER GLI INCENDI .....	25
2.1 TIPOLOGIE DI MODELLO .....	25
2.1.1 MODELLI A ZONE.....	25
2.1.2 MODELLI DI CAMPO .....	26
2.2 EQUAZIONI BASE DEI MODELLI CFD .....	27
2.3 CARATTERISTICHE DEI MOTI TURBOLENTI .....	31
2.4 MODELLAZIONE DELLA TURBOLENZA .....	33
2.4.1 MODELLO RANS – REYNOLDS AVERAGED NAVIER STOKES .....	33
2.4.2 MODELLO LES – LARGE EDDY SIMULATION .....	36
2.4.3 DNS – DIRECT NUMERICAL SIMULATION .....	38
2.5 CARATTERISTICHE DI FDS (FIRE DYNAMICS SIMULATOR) .....	39
2.5.1 PYROSIM.....	40
3. PROVE SPERIMENTALI.....	41

3.1	CURVA DI POTENZA TERMICA RILASCIATA.....	41
3.2	RATEO DI CRESCITA .....	44
3.3	LIMITI DELL'APPROCCIO .....	45
4.	ANALISI DEI MODELLI DISPONIBILI PER LA SIMULAZIONE.....	47
4.1	MODELLI DI PIROLISI.....	47
4.1.1	MODELLO DI PIROLISI SEMPLICE.....	47
4.1.2	MODELLO DI PIROLISI COMPLESSA.....	48
4.2	REAZIONE DI COMBUSTIONE .....	53
4.2.1	SIMPLE CHEMISTRY .....	54
4.2.2	COMPLEX STOICHIOMETRY .....	55
4.3	MODELLO DI TRASFERIMENTO DI CALORE .....	55
5.	MODELLAZIONE .....	58
5.1	DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI INPUT .....	59
5.1.1	IMPOSTAZIONE DELLE PROPRIETÀ.....	62
5.1.2	PIROLISI .....	62
5.1.3	ENTALPIA DI PIROLISI .....	64
5.1.4	COMBUSTIONE .....	66
5.2	GEOMETRIA DI MODELLAZIONE.....	68
5.3	SCELTA DEL MODELLO DI TRASFERIMENTO DI CALORE.....	69
5.4	VALUTAZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO .....	71
5.5	CARATTERISTICHE DELL'INNESCO .....	77
5.5.1	TEMPO DI IGNIZIONE .....	77
5.5.2	TEMPERATURA DELL'INNESCO.....	79
5.6	CONFRONTO TRA I MODELLI DI COMBUSTIONE.....	81
5.7	CARATTERISTICHE DEL MODELLO PIÚ REALISTICO .....	82
6.	CONFRONTO CON LE PROVE SPERIMENTALI.....	83
	CONCLUSIONI .....	88

ELENCO FIGURE .....	91
ELENCO TABELLE .....	93
APPENDICE .....	94
CALCOLO SPESSORE .....	94
SIMULAZIONE A .....	94
SIMULAZIONE B .....	96
SIMULAZIONE C .....	98
BIBLIOGRAFIA .....	101

## INTRODUZIONE

L'ingegneria antincendio ha come obiettivo la sicurezza della vita umana e la tutela dei beni e dell'ambiente attraverso la predisposizione di norme, provvedimenti e la progettazione di misure di sicurezza, al fine di evitare l'insorgenza di un incendio e degli eventi ad esso connessi. Attualmente la prevenzione incendi può essere approcciata secondo due strategie: l'approccio prescrittivo e l'approccio prestazionale. Il primo, utilizzato da quando esiste la prevenzione incendi, è basato sul rispetto di norme prescrittive che impongono per ogni tipo di attività o per gruppi di attività una serie di obblighi. Esso comporta l'applicazione di una normativa che risolve la maggior parte dei casi che si possono riscontrare nella realtà, ma esistono diverse situazioni in cui la rigidità delle prescrizioni non permette di ottenere una soluzione percorribile o soddisfacente. Tali limitazioni possono essere superate tramite l'approccio prestazionale, chiamato FSE (*Fire Safety Engineering*), che permette ai progettisti di avere maggiore flessibilità, consentendo di valutare diversi scenari d'incendio e l'effetto delle misure di sicurezza proposte. Questo nuovo tipo di approccio si basa sulla valutazione scientifica del fenomeno della combustione e degli effetti dell'incendio, tramite modelli di calcolo con cui è possibile effettuare simulazioni che permettono di predire la dinamica evolutiva dell'incendio. Questo approccio avviato in Europa in seguito alla direttiva 89/106/CEE come equivalente e alternativo all'approccio prescrittivo, è stato poi sviluppato attraverso la metodologia descritta secondo la norma ISO/TR13387 che consiste nell'applicare, basandosi su una valutazione scientifica dell'incendio, norme e principi di stampo ingegneristico per il raggiungimento della sicurezza antincendio. In Italia è stato introdotto per la prima volta con i decreti ministeriali DM 09/03/2007 e DM 09/05/2007 e attualmente segue come testo di riferimento il DM 03/08/2015 e ss.mm.ii. noto come Codice di Prevenzione Incendi.

Per effettuare le simulazioni i modelli di calcolo utilizzati dalla FSE sono principalmente di due tipologie: modelli a zone e modelli di campo basati sulla fluidodinamica computazionale CFD (*Computational Fluid Dynamics*), presentati di seguito all'interno dell'elaborato. Per entrambe le tipologie di modelli la curva di potenza termica rilasciata dall'incendio (HRR – *Heat Release Rate*) è un parametro di fondamentale importanza che può essere definito come dato di input

o viene ottenuto tra i risultati della simulazione. Nella maggior parte dei casi le simulazioni vengono svolte per valutare gli effetti dell'incendio avendo già nota la curva di potenza termica rilasciata, che può essere reperita in letteratura secondo alcuni criteri o misurata sperimentalmente attraverso delle prove d'incendio o *fire-test*. Il primo approccio è quello più semplice e rapido, ma definisce una curva molto approssimata ed in genere conservativa; mentre, nel caso in cui ci sia la possibilità di effettuare una prova d'incendio la curva HRR determinata è più precisa. La curva HRR può essere però ottenuta anche come risultato della simulazione dei fenomeni chimici e fisici che caratterizzano lo sviluppo dell'incendio, se si dispone di una quantità di dati sufficienti per la descrizione dei materiali e delle condizioni presenti. Quest'ultimo approccio viene solitamente utilizzato a fini investigativi, per riprodurre incendi già avvenuti e richiede studio e ricerche in letteratura per la modellazione; quindi, rappresenta quello più complesso e dispendioso.

Il presente lavoro di tesi si focalizza sulla modellazione della curva di potenza termica rilasciata in un incendio reale attraverso la simulazione CFD. Tale analisi rappresenta un approfondimento svolto nell'ambito dello studio antincendio di un magazzino di merce di materiale plastico, nel quale si è fatto uso di una curva HRR ricavata dai dati sperimentali di un *fire-test* seguendo l'approccio proposto dalla normativa NFPA 921. Tale norma propone di stimare la curva HRR attraverso una relazione semplificata che ha come unico parametro di input l'altezza di fiamma misurata nel test sperimentale. Questo tipo di approccio, pur fornendo un'utile stima sulla potenza termica rilasciata, non tiene conto di alcuni fenomeni chimici e fisici che governano lo sviluppo dell'incendio, tra i quali la pirolisi e il trasporto di calore all'interno del combustibile solido.

Lo scopo del presente lavoro di tesi è di analizzare le possibilità di utilizzare un approccio più avanzato per la modellazione della curva HRR, tenendo conto di tali fenomeni, attraverso l'utilizzo di un software CFD. Nello specifico, è stato utilizzato il software FDS (*Fire Dynamics Simulator*) sviluppato dal NIST (*National Institute of Standards and Technology*) ed ampiamente utilizzato nell'ambito dell'Ingegneria della sicurezza antincendio per predire le dinamiche degli incendi e valutare gli ipotetici scenari d'incendio che si possono sviluppare e l'effetto delle misure di sicurezza.

Per realizzare la simulazione sono stati analizzati i vari modelli disponibili per la riproduzione dei fenomeni all'interno del software FDS. I dati di input necessari, relativi principalmente alle proprietà dei materiali ed alle reazioni di pirolisi e combustione coinvolte durante l'incendio, sono stati ricavati dalla letteratura. Vista la varietà di metodi alternativi e di ipotesi semplificative applicabili alla modellazione, sono state effettuate diverse simulazioni. I risultati ottenuti dai diversi approcci sono stati confrontati tra loro e con quelli derivanti dall'applicazione della normativa NFPA ai dati sperimentali.

Il lavoro di tesi è strutturato come segue:

- nel **capitolo 1** sono esposti gli aspetti generali del fenomeno dell'incendio al fine di comprendere per la sua modellazione il funzionamento dei fenomeni coinvolti e riuscire a valutare i risultati ottenuti;
- nel **capitolo 2** sono presentate le tipologie di modelli di calcolo che possono essere utilizzate per la simulazione e il funzionamento dei modelli CFD, alla base del software utilizzato, al fine di migliorarne l'utilizzo e comprenderne le limitazioni;
- nel **capitolo 3** viene descritto il lavoro svolto sulle prove sperimentali per l'ottenimento della curva di potenza termica rilasciata seguendo l'approccio proposto dalla NFPA 921;
- nel **capitolo 4** sono analizzati i vari metodi alternativi, incontrati durante lo studio per la modellazione, per la riproduzione dei fenomeni che avvengono durante l'incendio, in modo da poter valutare quello che fornisce una descrizione più realistica del caso;
- nel **capitolo 5** viene descritto il processo di modellazione: le ipotesi semplificative, l'ottenimento dei dati di input dalla letteratura e la valutazione dei diversi aspetti per la riproduzione dei fenomeni all'interno del software al fine di raggiungere la simulazione più realistica possibile, da confrontare con i risultati ottenuti dall'utilizzo della normativa;
- nel **capitolo 6** viene svolto il confronto tra i risultati forniti dal modello scelto con quelli derivanti dall'applicazione della normativa NFPA.

## **1. L' INCENDIO**

In questo capitolo sono esposti gli aspetti generali del fenomeno dell'incendio, quali la sua origine, le sue conseguenze e le varie fasi di sviluppo, che sono necessari per la sua comprensione e la successiva modellazione. Inoltre, particolare attenzione è posta sul principale parametro di analisi degli incendi: la curva di potenza termica rilasciata, che è stata utilizzata per confrontare i diversi modelli e valutare i risultati ottenuti dall'approccio fornito dalla normativa NFPA 921.

### **1.1 PROCESSO DI COMBUSTIONE**

Un incendio è una reazione di combustione incontrollata che avviene velocemente accompagnata da forte sviluppo di energia termica, fumo, gas e luce. Si definisce reazione di combustione qualsiasi reazione chimica nella quale un combustibile, sostanza ossidabile, reagisce con un comburente, sostanza ossidante, liberando energia in genere sotto forma di calore. Una combustione è quindi una reazione di ossidoriduzione, ovvero una reazione in cui si ha un passaggio di elettroni da una specie chimica all'altra; in particolare il combustibile entrando in contatto con il comburente perde elettroni ossidandosi, e il comburente acquistandoli, si riduce. Per gli incendi, la reazione di combustione considerata è una reazione di ossidazione rapida mediante ossigeno. Perché avvenga la reazione di combustione è necessario che sia presente, oltre al combustibile e al comburente, una sorgente che rilascia un adeguato valore di energia termica in grado di dare avvio alla reazione. La combustione può essere rappresentata in modo schematico dal triangolo del fuoco [Figura 1.1] in cui per ogni lato è presente uno dei tre componenti necessari: combustibile, comburente e innesco. In assenza di uno di essi la reazione non avviene, quindi per interrompere un incendio è sufficiente eliminare uno dei tre.

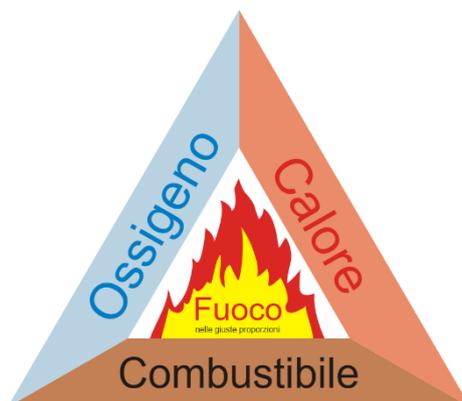


Figura 1.1 Triangolo del fuoco (fonte: gt-engineering.it)

Affinché la reazione di combustione possa avvenire, il combustibile e il comburente devono essere in proporzioni adeguate delimitate dal campo di infiammabilità. La reazione tra il combustibile e il comburente non è spontanea, ma avviene ad opera di un innesco, che rappresenta l'energia di attivazione necessaria alle molecole di reagenti per far avvenire la reazione. Le molecole di reagenti devono infatti urtarsi tra loro e riarrangiare opportunamente gli atomi per formare i prodotti e questo processo richiede una elevata energia detta di attivazione. L'energia posseduta dalle molecole è legata al loro moto e quindi alla loro temperatura. Più è elevata la temperatura, maggiore è la probabilità che l'urto superi l'energia di attivazione e sopra una certa temperatura, detta temperatura di ignizione, si verificano un gran numero di collisioni efficaci, tali da ottenere la reazione.

La temperatura è il parametro che maggiormente influenza la velocità di reazione: per bassi valori le combustioni avvengono lentamente e senza rapido sviluppo di calore che viene dissipato nel momento in cui si produce, mentre al di sopra della temperatura di ignizione il calore generato è tale da permettere l'autosostentamento della reazione, senza la necessità di ulteriori apporti energetici esterni. L'innalzamento della temperatura viene manifestato attraverso l'emissione di onde elettromagnetiche nel campo del visibile rappresentate dalle fiamme.

## 1.2 COMBUSTIBILI

In generale i materiali si possono suddividere, in base al loro comportamento al fuoco, in incombustibili (non bruciano), in combustibili non infiammabili o difficilmente infiammabili (materiali che smettono di bruciare se non a contatto con una sorgente di ignizione), in combustibili infiammabili, facilmente infiammabili ed estremamente infiammabili (se continuano a bruciare tolta la sorgente di ignizione e la loro infiammabilità è classificata in base alla loro temperatura di infiammabilità). Inoltre, la norma internazionale UNI EN2 del 2005 stabilisce una classificazione degli incendi in base al tipo di materiale combustibile [Tabella 1.1]. Si distinguono cinque categorie:

CLASSE	COMBUSTIBILE
A	MATERIALI SOLIDI
B	LIQUIDI INFIAMMABILI
C	GAS INFIAMMABILI
D	METALLI COMBUSTIBILI
F*	OLI E GRASSI

Tabella 1.1 Classificazione degli incendi

I combustibili più comuni sono costituiti principalmente da carbonio e idrogeno e possono presentarsi in forma solida, liquida o gassosa, ma la combustione avviene sempre in fase gassosa. Perciò per fare in modo che la combustione avvenga è necessario che i solidi e i liquidi raggiungano una temperatura tale da generare vapori con concentrazione sufficiente da ricadere all'interno del campo di infiammabilità. Esso rappresenta il range di concentrazioni dei vapori di combustibile in aria, tale per cui il processo di combustione possa innescarsi. Per questo motivo i solidi e liquidi non possono bruciare direttamente ma devono prima trasformarsi in vapore attraverso processi di tipo fisico o chimico come la pirolisi, descritta nella sezione 1.7.

---

\* La lettera mancante E includeva la classe fuochi da impianti e attrezzature elettriche sotto tensione, che nel nuovo aggiornamento del 2005 è stata spostata all'interno delle classi A o B, in quanto la caratteristica di essere sotto tensione, non è stata ritenuta sufficiente a mantenerli in una categoria a parte.

## **1.3 PRODOTTI DI COMBUSTIONE**

I prodotti della combustione determinano la pericolosità dell'incendio e si distinguono in gas di combustione, fiamme, fumi e calore.

### **1.3.1 GAS DI COMBUSTIONE**

I prodotti della reazione di combustione dipendono dalla natura del combustibile e dalle condizioni di reazione. Dal processo di combustione dei composti più comuni che contengono principalmente carbonio e idrogeno si ha la formazione di acqua liquida o vaporizzata e diossido di carbonio. Se la concentrazione di ossigeno non è però sufficiente ad ossidare completamente il carbonio, avvengono reazioni di ossidazione parziale che portano alla formazione di ossido di carbonio. Mescolati ai prodotti di reazione si trovano di solito i prodotti di reazione dello zolfo, presente in quasi tutti i combustibili, gas inerti come l'azoto ed infine gas incombusti.

### **1.3.2 CALORE**

Il calore rilasciato corrisponde al calore sviluppato dalla reazione chimica e può essere quindi calcolato tramite la differenza di entalpia tra i prodotti e i reagenti. Ogni specie chimica è caratterizzata da un potere calorifico che rappresenta l'energia liberata per unità di massa di combustibile. Il calore derivante dalla reazione è però dipendente dall'ossigeno presente; infatti, il massimo rilascio di energia termica si ottiene dalla combustione completa di una sostanza combustibile, mentre in difetto di ossigeno non viene liberata tutta l'energia disponibile.

### **1.3.3 FIAMME**

Le fiamme sono la parte visibile della combustione. I prodotti che si formano durante il processo di combustione hanno una temperatura tale da emettere onde elettromagnetiche nel campo della luce visibile ed essere quindi fonte di luce. La temperatura delle fiamme dipende dal tipo di combustibile, di comburente, dal tenore di ossigeno presente. Il colore della fiamma può essere un buon indicatore di temperatura, come indicato nella Figura 1.2

che rappresenta la scala cromatica in corrispondenza delle varie temperature, fornita dal sito dei Vigili del Fuoco.

Colore della fiamma		Temperatura (°C)
	Amaranto pallido	480
	Amaranto	525
	Rosso sangue	585
	Rosso scuro	635
	Rosso	675
	Rosso chiaro	740
	Rosso pallido	845
	Rosa	900
	Arancione	940
	Giallo	995
	Giallo pallido	1080
	Bianco	1205
	Celeste	1400

Figura 1.2 Colore della fiamma in relazione alla temperatura (fonte: vigilfuoco.it)

#### 1.3.4 FUMI

I fumi sono una dispersione colloidale di particelle liquide e solide nei gas prodotti durante la combustione che si verificano soprattutto quando la reazione avviene con scarsità di ossigeno. Le particelle solide conferiscono il tipico colore scuro ai gas prodotti, mentre il fumo di colore bianco è dovuto alla condensazione delle particelle liquide. I fumi possono avere colorazioni diverse a seconda del tipo di particelle incombuste rilasciate nell'aria, per questo motivo è possibile riconoscere dai fumi il tipo di combustibile che ha causato l'incendio. In Figura 1.3 l'elenco dei colori dei fumi corrispondenti al tipo di combustibile utilizzato dai Vigili del Fuoco.

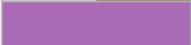
Colore		Tipo di combustibile
	Bianco	Paglia, Fosforo
	Giallo/marrone	Nitrocellulosa, Zolfo, Acido nitrico - solforico - cloridrico, Polvere da sparo.
	Grigio/marrone	Legno, Carta, Stoffa
	Viola	Iodio
	Marrone	Olio da cucina
	Marrone/nero	Nafta, Diluente per vernici
	Nero	Acetone, Cherosene, Benzina, Olio lubrificante, Gomma, Catrame, Carbone, Plastica

Figura 1.3 Colore dei fumi in relazione al tipo di combustibile (fonte: vigifuoco.it)

## 1.4 TIPOLOGIE DI INCENDIO

La velocità di combustione dipende dalla velocità di vaporizzazione da cui si forma il combustibile e costituisce l'elemento determinante e caratterizzante del fenomeno. Gli incendi, in funzione della velocità di combustione possono suddividersi a sviluppo lento, medio e veloce a seconda che nella fase iniziale si abbia una intensa produzione di potenza termica, di fiamma e di prodotti di combustione. Essi possono manifestarsi in due diversi modi:

- incendio con produzione di fiamma;
- incendio covante.

Negli incendi con produzione di fiamma, lo sviluppo dell'incendio è contraddistinto dall'emissione di una radiazione elettromagnetica infrarossa e visibile, elevata produzione di energia termica e l'emissione di fumo di colore scuro. Negli incendi covanti, invece, la combustione procede in assenza di fiamma. In questo caso la superficie del combustibile si trova a temperature relativamente basse, con velocità inferiori a 1 mm/min e la combustione è accompagnata da scarsa luminosità, l'apporto termico all'ambiente è modestissimo e si ha formazione di fumo di colore chiaro. Pertanto, tra le due tipologie di incendio, gli incendi con produzione di fiamma rappresentano quelli più pericolosi. I prodotti di combustione, la fiamma ed il calore generato sono rilevanti solo per la prima tipologia di incendio.

## 1.5 FASI DI SVILUPPO

L'evoluzione di un incendio può essere schematizzata in quattro fasi caratteristiche [Figura 1.4]:

- ignizione;
- crescita;
- incendio pienamente sviluppato;
- decadimento.

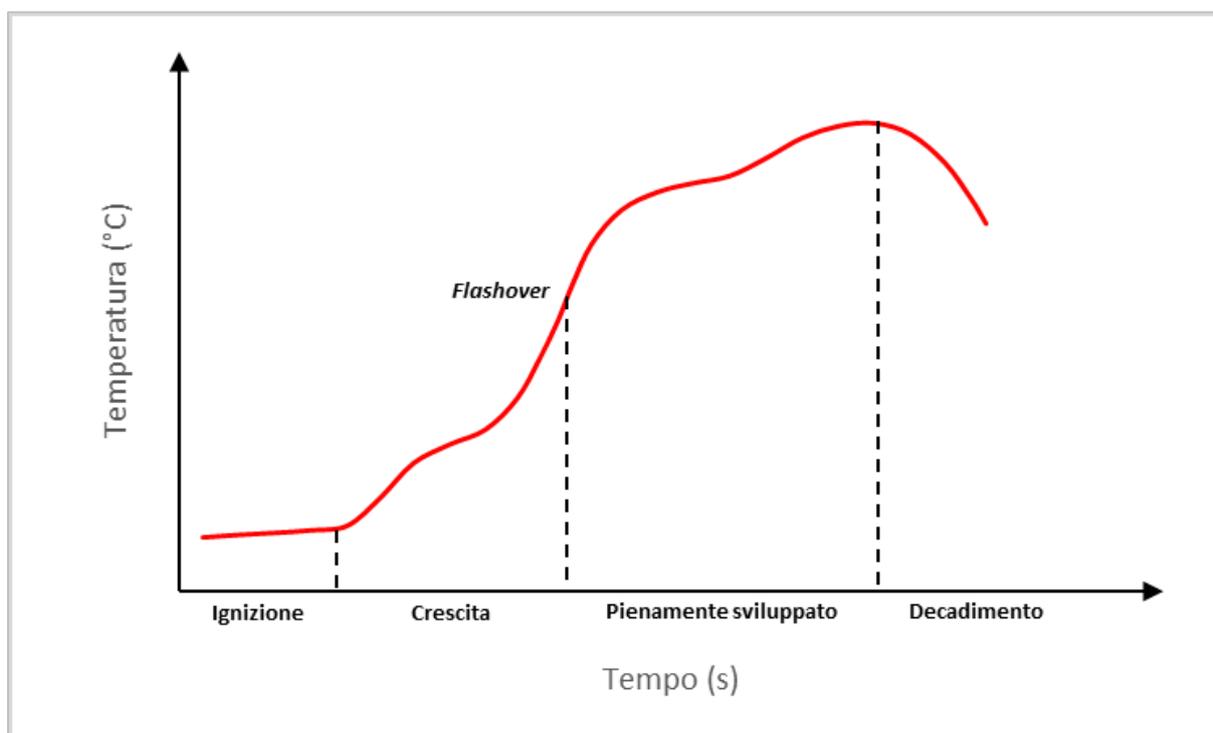


Figura 1.4 Fasi di sviluppo di un incendio

### IGNIZIONE

In questa fase ha inizio il processo di combustione: un combustibile sottoposto a una sorgente termica esterna per un determinato periodo di tempo viene riscaldato fino alla sua temperatura di ignizione e la miscela combustibile-comburente inizia a bruciare. L'energia termica necessaria al raggiungimento della temperatura di ignizione è fortemente influenzata dalla massa rispetto alla superficie esposta all'aria e dall'umidità presente all'interno del combustibile. La combustione avviene in fase gassosa, perciò in questa fase un combustibile

solido o liquido deve liberare vapori in concentrazione sufficiente da poter bruciare. Un combustibile solido se viene riscaldato tende parzialmente a vaporizzare tramite il processo di pirolisi, producendo vapori che reagiscono con l'ossigeno formando una fiamma nella zona immediatamente soprastante la superficie del combustibile. La sua infiammabilità è principalmente rappresentata da due fattori: dalla tendenza a rilasciare i prodotti di pirolisi in quantità sufficiente da poter bruciare e dalla velocità di propagazione della fiamma lungo la sua superficie. La durata di tale fase dipende dall'infiammabilità del combustibile, dalla velocità di decomposizione del combustibile coinvolto, dalla distribuzione del combustibile nell'ambiente e possibilità di dissipazione del calore.

Per valutare l'infiammabilità di un combustibile e se il processo di combustione può continuare stabilmente nel tempo data una sorgente termica esterna, in letteratura (la Malfa & la Malfa, 2009) si definiscono i seguenti parametri: si indica con  $L_v$  l'energia termica necessaria per produrre la pirolisi di 1 kg di combustibile e con  $H$  il suo potere calorifico, entrambi espressi in kJ/kg. Maggiore è il rapporto tra  $H/L_v$  tanto più velocemente il combustibile brucerà. Un combustibile liquido generalmente risulta più pericoloso di un combustibile solido proprio perché questo rapporto è più elevato. Perché la combustione possa procedere in modo continuo, una volta che una zona sulla superficie del combustibile ha raggiunto la sua temperatura di ignizione, è necessario che la fiamma che si genera debba autosostenersi e ciò è possibile solo se è presente una sorgente di calore esterna che può innescare i prodotti di pirolisi o se la stessa fiamma è in grado di trasmettere alla superficie immediatamente adiacente un valore di energia termica tale da far produrre con continuità adeguata di vapori combustibili.

Tale processo si verifica se in una zona della superficie del combustibile viene raggiunta una temperatura minima, leggermente maggiore della temperatura d'ignizione, denominata di *fire point*, alla quale corrisponde un flusso massico sufficiente dei prodotti di pirolisi che consente la persistenza della fiamma sulla superficie. La condizione che permette al processo di combustione di continuare stabilmente nel tempo è data dal bilancio termico all'Eq. (1.1) che deve condurre a un flusso termico  $q$  positivo:

$$q = (f \cdot H - L_v) \cdot m_{cr} + q_e + q_d > 0 \quad \text{Eq. (1.1)}$$

dove:

- $f$  indica la frazione del flusso termico generato dalla fiamma che si origina dalla combustione dei prodotti di pirolisi;
- $q_e$  rappresenta il flusso termico, supposto costante, dalla sorgente termica [ $kW/m^2$ ];
- $q_d$  rappresenta il flusso termico disperso per convezione e irraggiamento [ $kW/m^2$ ];
- $m_{cr}$  indica il flusso di massa critico dei prodotti di pirolisi che si liberano dalla superficie del combustibile [ $kg/(m^2s)$ ].

Qualora  $q_e$  vari nel tempo è necessario che ci sia almeno un determinato valore del flusso di massa critico, in modo che se anche  $q_e$  tende a 0 il flusso termico netto rimanga comunque positivo. Subito dopo l'ignizione il processo di combustione potrà continuare ad estendersi su tutto il materiale solo se, nella zona adiacente a quella che per prima è bruciata, tale flusso  $q$  sarà positivo, quindi in grado di causare l'aumento della temperatura sulla superficie del combustibile con conseguente incremento della produzione dei prodotti di pirolisi e potenziamento della fiamma. Inoltre, nel processo di propagazione del calore all'interno del materiale riveste un ruolo fondamentale lo spessore del combustibile. La resistenza offerta da un materiale combustibile nel creare una massa sufficiente di prodotti di pirolisi e a propagare la combustione viene individuata con il parametro TRP di risposta termica (Eq. (1.2)):

$$TRP = (T_{ig} - T_s) \cdot \sqrt{\rho \cdot c_p \cdot k} \quad \left[ \frac{kWs^{0.5}}{m^2} \right] \quad \text{Eq. (1.2)}$$

dove:

- $T_{ig} - T_s$  è la differenza tra la temperatura di ignizione e quella a cui si trova inizialmente la superficie del combustibile;
- $\rho$ ,  $c_p$  e  $k$  sono rispettivamente la densità, il calore specifico e la conduttività termica del materiale alla temperatura media tra quella di ignizione e quella del materiale.

I combustibili caratterizzati da piccoli valori di  $TRP$ , aumentano velocemente le loro temperature ed hanno maggiore tendenza ad incendiarsi. La quantità  $\sqrt{\rho \cdot c_p \cdot k}$  rappresenta l'inerzia termica e influenza le variazioni di temperatura che si verificano nel combustibile soggetto all'azione di una sorgente di calore. Per molti materiali il calore specifico non varia sensibilmente e la conduttività termica dipende dalla densità, quindi, segue che la densità influenza significativamente il valore di inerzia termica. Minore è la densità, inferiore è l'inerzia termica quindi i materiali tendono a riscaldarsi rapidamente e raggiungere con facilità la temperatura di ignizione.

### **CRESCITA**

Dopo l'ignizione, l'incendio cresce in funzione delle caratteristiche del combustibile come la tipologia, lo stato fisico, la massa, la distribuzione e la sua disposizione spaziale nell'ambiente. In tale fase, lo sviluppo dell'incendio produce: gas tossici, irritanti e corrosivi, un aumento della velocità di combustione nel tempo, un aumento della temperatura e della potenza termica che viene irradiata nell'ambiente e nel caso di incendio al chiuso anche una riduzione della visibilità dovuta all'emissione dei prodotti di combustione.

### **INCENDIO PIENAMENTE SVILUPPATO (FLASHOVER)**

Questa fase è divisa dalla precedente dal punto di *flash-over*. Da questo punto lo sviluppo dell'incendio subisce una brusca variazione dovuta al fatto che tutti i materiali combustibili raggiungono la loro temperatura di ignizione e sono coinvolti simultaneamente nell'incendio. Durante questo stadio si ha il maggiore rilascio di potenza termica e viene raggiunta la massima velocità di combustione.

### **DECADIMENTO**

Dopo aver raggiunto l'ignizione di tutti i materiali combustibili presenti, l'incendio tende a rallentare per il progressivo esaurimento di combustibile e si avvia all'estinzione con graduale riduzione del flusso termico generato. La velocità di combustione decresce e anche la temperatura inizia a diminuire in relazione alla potenza termica ancora sviluppata. La fase di decadimento può ritenersi praticamente conclusa quando la temperatura media

nell'ambiente è diminuita a valori inferiori a 200°C in quanto, in tale situazione, possono ragionevolmente escludersi improvvisi re-inneschi dei materiali combustibili.

## **1.6 POTENZA TERMICA RILASCIATA DA UN INCENDIO**

La temperatura massima e la portata di fumo e di gas nocivi che si liberano durante la combustione sono due grandezze importanti per valutare la pericolosità di un incendio e i loro valori dipendono dalla potenza termica rilasciata dall'incendio, ovvero dalla rapidità con la quale l'energia termica viene sviluppata. Essa, quindi, rappresenta il principale parametro che descrive lo sviluppo di un incendio.

Durante l'evoluzione di un incendio, la potenza termica totale rilasciata varia continuamente nel tempo e il suo valore ad un determinato istante può essere calcolato tramite il prodotto tra la velocità di combustione  $m_c$  [kg/s] e il potere calorifico del combustibile  $H$  [kJ/kg]:

$$HRR(t) = m_c(t) \cdot H \quad \left[ \frac{kJ}{s} \right] \quad \text{Eq. (1.3)}$$

Le curve di variazione nel tempo dei valori di potenza termica dai vari materiali combustibili hanno sempre una fase di crescita, una di decadimento e un tratto superiore, di durata variabile, nel quale la potenza una volta raggiunto il valore massimo, si mantiene circa costante. In alcuni casi, se la combustione si svolge dapprima in modo covante per poi continuare con presenza di fiamma, si può riscontrare anche una fase iniziale di crescita della potenza molto lenta.

Per stimare la variazione di potenza termica rilasciata durante un incendio il modo più preciso è quello di eseguire delle prove sperimentali, anche se tale procedura è applicabile solo nel caso di oggetti di dimensioni limitate, utilizzando il cono calorimetrico che misura il calore di combustione basandosi sulla quantità di ossigeno richiesta per la combustione e la portata massica del combustibile bruciato.

La potenza termica viene rilasciata nell'ambiente soprattutto per convezione e irraggiamento. Negli incendi naturali si assume come approssimazione che circa i 2/3 sono rilasciati per convezione ed 1/3 per irraggiamento.

Perché si instauri un significativo processo di combustione per un combustibile sottoposto all'azione di una sorgente di calore, deve trascorrere il tempo di ignizione che dipende dal valore della potenza termica della sorgente, dalla posizione alla quale essa agisce e dalle proprietà del combustibile. Trascorso il tempo di ignizione, il combustibile si infiamma provocando così anche la combustione dei materiali vicini ad esso e l'incendio si propaga nell'ambiente rilasciando una potenza termica che varia nel tempo. Per un combustibile all'aperto, cioè in presenza di un'elevata quantità di aria, la velocità di combustione, quindi anche la potenza termica, tende ad aumentare esponenzialmente nel tempo, finché viene raggiunta una fase in cui l'incendio è pienamente sviluppato nella quale la potenza termica assume il suo valore massimo e si mantiene pressoché costante per un determinato intervallo di tempo, funzione della massa del combustibile inizialmente presente. In seguito, inizia a decrescere per il progressivo esaurimento di combustibile. Invece per un combustibile in ambiente chiuso, il combustibile che brucia sfrutta l'aria circostante presente nel locale e se il quantitativo d'aria è sufficiente l'incendio potrà convenientemente svilupparsi, altrimenti le fiamme tendono a scemare man mano che viene loro a mancare l'ossigeno necessario per bruciare tutti i prodotti di pirolisi che si sono formati. In questo caso la velocità di propagazione delle fiamme diminuisce e l'incendio procede in modo stentato fino all'esaurimento del combustibile, oppure può spegnersi spontaneamente. Pertanto, all'interno di un edificio il valore massimo che la potenza termica può raggiungere è influenzato sensibilmente dal quantitativo di aria presente e il valore massimo di HRR è minore di quello che potenzialmente avrebbe potuto raggiungere se si fosse sviluppato all'aperto. L'andamento generale della potenza termica rilasciata [Figura 1.5] che meglio rappresenta il comportamento di un incendio è quindi caratterizzato da una fase di crescita, un picco più o meno elevato a seconda delle condizioni appena descritte, una susseguente fase stazionaria e una fase di decadimento.

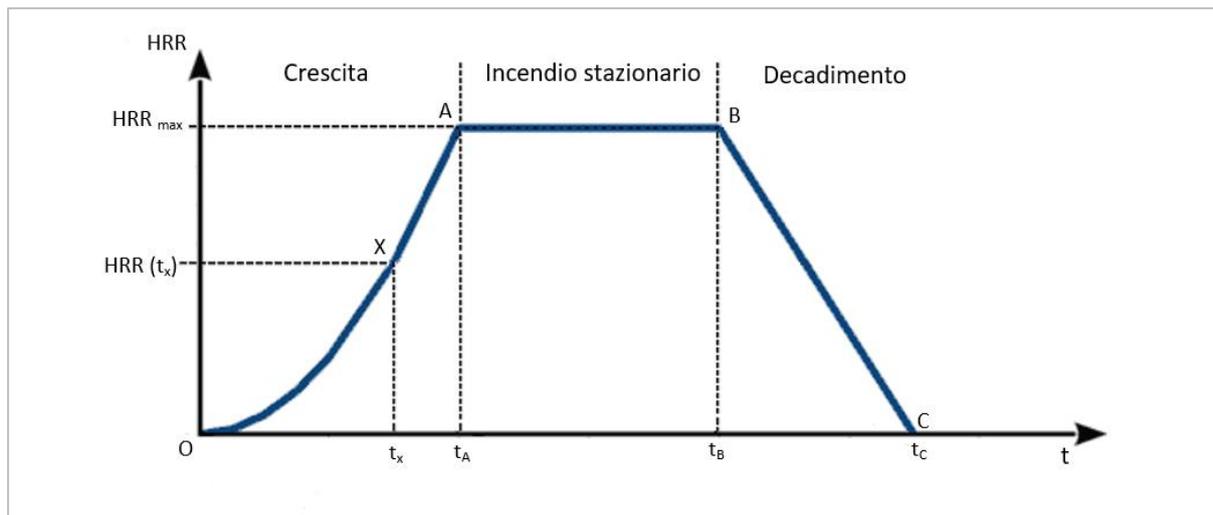


Figura 1.5 Andamento della potenza termica rilasciata (Mauro Malizia, n.d.)

Dall'istante iniziale il valore della potenza termica cresce con un andamento che spesso può essere proporzionale al quadrato del tempo, fino ad arrivare al *flashover*, corrispondente al punto X. Esso rappresenta il momento in cui vi è l'accensione improvvisa di un massiccio quantitativo di materiale combustibile e quasi tutto il materiale partecipa alla reazione contemporaneamente. Questo momento è caratterizzato da un brusco innalzamento della temperatura e si ha un improvviso incremento nello sviluppo del fuoco quindi si ha un tratto in cui la variazione di HRR è molto rapida e viene raggiunto il valore massimo della potenza termica rilasciata dall'incendio in corrispondenza del punto A del grafico. Si può ragionevolmente ritenere che il flash over si verifichi qualche minuto prima del tempo  $t_A$ . Successivamente si ha la fase stazionaria fino al tempo  $t_B$  e quella di decadimento fino al tempo  $t_C$ .

Durante indagini sperimentali è stato verificato che nella fase di crescita dell'incendio il valore di HRR spesso aumenta nel tempo in modo pressoché quadratico (Eq. (1.4)):

$$HRR = \alpha \cdot t^2 \quad \text{Eq. (1.4)}$$

dove  $\alpha$  è una costante, espressa in  $\text{kJ/s}^3$  che regola lo sviluppo della fase di crescita dell'incendio ed è tanto più grande, quanto più un materiale si lascia coinvolgere facilmente nell'incendio.

Per consentire di eseguire delle valutazioni quantitative in letteratura (Mauro Malizia, n.d.) sono state introdotte quattro curve predefinite di sviluppo che si differenziano per il loro tempo  $t_g$  caratteristico, ovvero in base al tempo necessario affinché la curva HRR cresca fino al valore di 1000 kW. A ciascun tempo caratteristico, corrisponde un diverso valore della costante  $\alpha$ . In Tabella 1.2 sono riportati i valori dei parametri delle quattro curve di sviluppo, mostrate in Figura 1.6.

CURVA DI SVILUPPO	$t_g$ (s)	$\alpha$ (kJ/s <sup>3</sup> )
LENTO	600	$2.77 \cdot 10^{-3}$
MEDIO	300	$11.11 \cdot 10^{-3}$
RAPIDO	150	$44.44 \cdot 10^{-3}$
ULTRA RAPIDO	75	$177.77 \cdot 10^{-3}$

Tabella 1.2 Parametri curve di sviluppo di un incendio

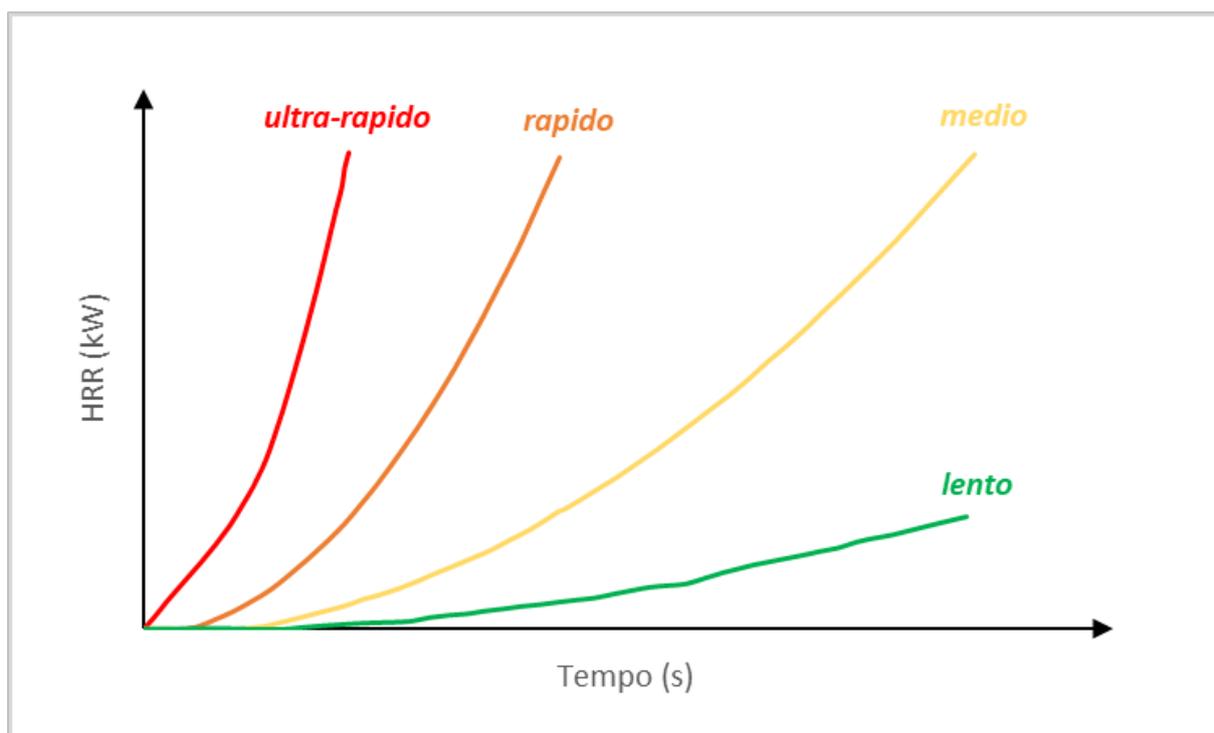


Figura 1.6 Curve di sviluppo di un incendio

## **1.7 PROCESSO DI PIROLISI**

Diversamente da un combustibile gassoso in cui avviene direttamente la reazione di combustione, i materiali solidi e liquidi non possono bruciare, ma devono prima trasformarsi in vapore. Una volta che i vapori infiammabili raggiungono in aria una concentrazione sufficiente (cioè il limite inferiore di infiammabilità) la miscela vapori-aria può bruciare in presenza di un innesco. La trasformazione da materiale solido o liquido a vapore può avvenire tramite diversi processi di tipo fisico come semplici passaggi di stato o chimico come la pirolisi. La pirolisi è il processo di degradazione termica di un solido o un liquido sottoposto a una sorgente di calore senza interazione con ossigeno e altri ossidanti che porta alla trasformazione del materiale in piccole molecole volatili. Essa non è un cambiamento di fase ma un processo chimico, necessario per la maggior parte dei combustibili solidi e può seguire, come descritto in letteratura (Stauffer et al., 2008) tre tipi principali di meccanismi:

- il meccanismo di scissione a random, che si verifica quando tutti gli elementi della catena sono identici. In questo caso i legami carbonio-carbonio tra le molecole del polimero hanno tutti della stessa intensità e la scissione avviene a random;
- il meccanismo di scissione del gruppo laterale in cui si verifica che la rottura del legame carbonio-elemento laterale avviene prima del legame carbonio-carbonio. Un esempio è la pirolisi del PVC in cui gli atomi di carbonio legati lateralmente a molecole di idrogeno e cloro liberano prima questi atomi portando alla formazione di acido cloridrico;
- il meccanismo di inversione a monomero, chiamata anche depolimerizzazione che porta il polimero a scomporsi nel suo monomero di partenza.

Molti polimeri, a causa della loro struttura, seguono prevalentemente un tipo di meccanismo di pirolisi piuttosto che un altro, ma molti altri ne subiscono più di un tipo. Ciascun meccanismo è un processo di tipo radicalico e si divide in tre step: iniziazione, propagazione e terminazione. Nel processo di iniziazione si ha la rottura di un legame ad opera del calore che porta alla formazione di due radicali che attaccano un'altra catena polimerica sul legame più debole. A questo punto si ha la fase di propagazione in cui si formano sempre più radicali che attaccano a loro volta la catena stessa o altre catene polimeriche e il meccanismo si propaga

velocemente rilasciando monomeri o piccole molecole volatili. A un certo punto avviene la fase di terminazione in cui, per il termine della catena, o per la presenza di un ramo laterale o qualsiasi irregolarità si ha la combinazione di due radicali e il processo termina.

Il processo di pirolisi può essere descritto attraverso un'analisi termo-gravimetrica, una tecnica sperimentale di analisi termica che permette di caratterizzare il materiale. Essa consiste nella misurazione continua della variazione di massa del campione soggetto a una rampa di riscaldamento, in condizioni di atmosfera controllata, solitamente inerte. Il risultato di tale analisi è il termogramma o curva di decomposizione termica, un grafico in cui viene riportata sull'asse delle ascisse la temperatura e sull'asse delle ordinate la variazione di massa in valore assoluto o percentuale. Spesso inoltre può essere riportata anche la velocità di variazione della massa, che mostra esattamente a quale temperatura la decomposizione del materiale è più rapida. Nella sezione 5.1.2 per la realizzazione del modello è stata studiata l'analisi termo-gravimetrica del materiale preso in considerazione.

## **2. MODELLI DI CALCOLO PER GLI INCENDI**

In questo capitolo sono presentate brevemente le principali tipologie di modelli di calcolo che possono essere utilizzate per la simulazione degli incendi, approfondendo le caratteristiche dei modelli di fluidodinamica computazionale (CFD) su cui si basa il software FDS (*Fire Dynamics Simulator*) utilizzato all'interno dell'elaborato. I modelli CFD sono basati su una serie di equazioni risolte numericamente attraverso l'utilizzo di modelli presentati di seguito, per tenere conto delle caratteristiche di turbolenza del moto dei fluidi durante il fenomeno dell'incendio. Infine, vengono forniti i tratti caratteristici del software FDS e la sua interfaccia PyroSim.

### **2.1 TIPOLOGIE DI MODELLO**

La modellazione di un incendio nel tempo e nello spazio può essere determinata attraverso un'ampia varietà di modelli di calcolo, in letteratura (Amico et al., 2011) sono principalmente categorizzati in due gruppi: i modelli a zone e i modelli di campo o modelli di fluidodinamica computazionale CFD, dei quali è approfondito il funzionamento.

#### **2.1.1 MODELLI A ZONE**

I modelli a zone sono più semplici e permettono di ottenere risultati in breve tempo, grazie alle ridotte risorse computazionali richieste, ma sono limitati alla modellazione di incendi in ambiente confinato di geometria semplice. Il dominio di calcolo è suddiviso in due o più volumi a perfetta miscelazione, nei quali si assume che le proprietà intensive siano omogenee. L'incendio è schematizzato in tre zone [Figura 2.1]: uno strato caldo superiore in cui si ha presenza di fumi, gas caldi e prodotti di combustione, uno strato freddo inferiore libero da fumo e una zona detta "*plume*" corrispondente al focolare in cui si ha la combustione e il risucchio dell'aria dallo strato inferiore a quello superiore. I modelli a zone risolvono in modo esatto un set di equazioni approssimate di conservazione di quantità di moto, energia e materia, fornendo come output il valore delle proprietà intensive allo stato stazionario o in funzione del tempo. Uno dei modelli a zone più utilizzato è CFAST (*Consolidated Fire and*

Smoke Transport), un software sviluppato dal NIST (National Institute of Standards and Technology) che permette di valutare l'evoluzione temporale della distribuzione di fumi e gas di combustione in un edificio durante un incendio definito dall'utente.

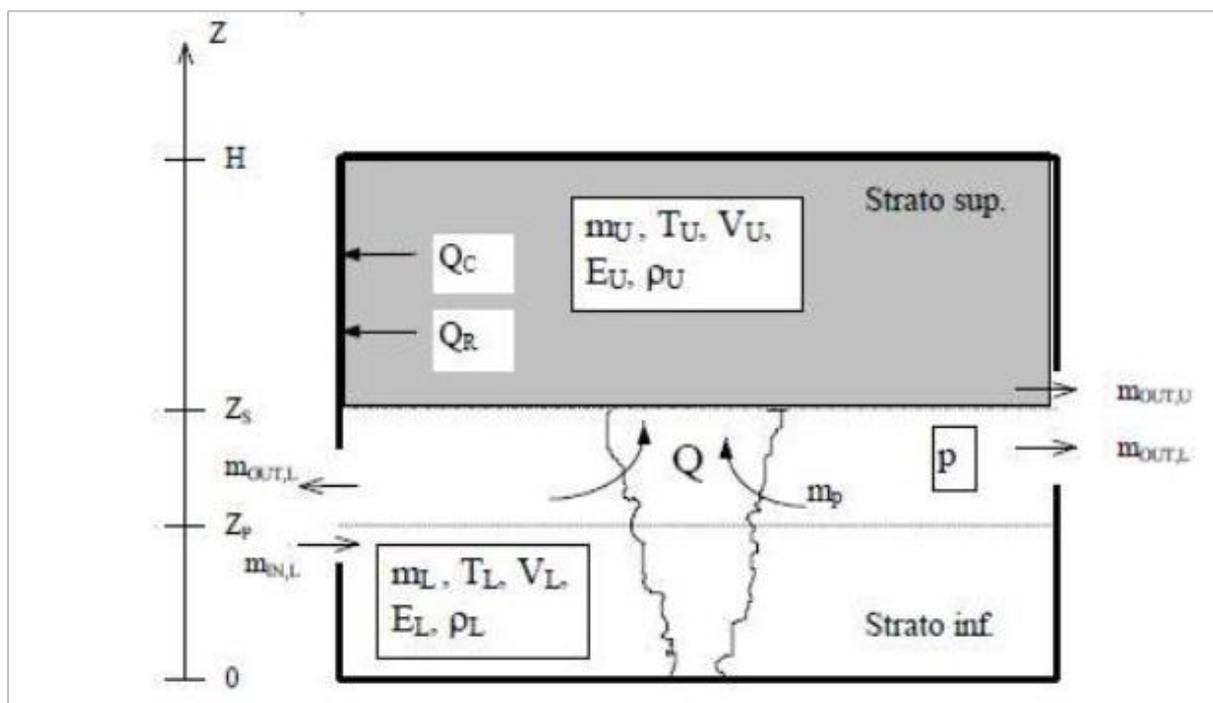


Figura 2.1 Schema di un modello a due zone (fonte: infobuild.it)

### 2.1.2 MODELLI DI CAMPO

I modelli di campo si basano sulla fluidodinamica computazionale che permette lo studio di tutte le problematiche che coinvolgono l'azione di fluidi. Essi forniscono la stima dell'evoluzione e degli effetti dell'incendio e possono essere utili quando gli altri modelli portano a soluzioni eccessivamente conservative o in caso di ricerca e investigazione dell'incendio. Sono attualmente la tecnica più sofisticata per la modellazione di incendi e sono in grado di descrivere scenari anche di elevata complessità, ma richiedono molto tempo di calcolo. Rispetto ai modelli a zone i dati di input richiesti per la modellazione sono molto più numerosi e l'andamento della curva di rilascio termico HRR può essere determinata dal modello stesso.

In questi modelli deve essere assegnato allo spazio un dominio di calcolo diviso secondo una griglia di celle tridimensionali chiamata *mesh*, in cui per ciascuna cella vengono risolte le equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia. Maggiore è il numero di elementi, più dettagliata sarà la soluzione. Inoltre, la suddivisione dello spazio in celle tridimensionali consente di studiare geometrie diverse e più complesse di quelle assimilabili a parallelepipedi, previste dai modelli a zone. Per ciascuna cella essi sono in grado di calcolare i valori di tutte le variabili necessarie all'analisi del fenomeno.

L'utilizzo pratico dei modelli CFD all'interno dei campi dell'ingegneria è stato possibile negli ultimi vent'anni, grazie al progresso nell'ambito dei computer che ha permesso di ottenere tempi di calcolo sempre più brevi e una maggior diffusione dei software commerciali. Il software FDS sviluppato e distribuito dal NIST è il programma di modellazione più diffuso nella comunità di prevenzione incendi ed è quello utilizzato all'interno dell'elaborato.

## **2.2 EQUAZIONI BASE DEI MODELLI CFD**

I modelli CFD sono basati sulle equazioni di Navier-Stokes, un set di equazioni differenziali che esprimono la conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia all'interno dello spazio occupato dalle fiamme e circostante. Queste equazioni sono risolte per via analitica solamente per i casi semplici con moti laminari, mentre per i casi reali in cui compaiono frequentemente flussi turbolenti, è necessario risolvere numericamente ciascuna delle migliaia di celle tridimensionali che costituiscono la *mesh*. Visto che generalmente la determinazione delle soluzioni ha un costo computazionale molto elevato per superare questo limite si sono sviluppati diversi approcci matematici che non pretendono di risolvere direttamente le equazioni di Navier-Stokes ma che si limitano a risolverne una parte e utilizzare un modello per tenere conto di ciò che volutamente viene trascurato. L'approccio consiste nel rimuovere la componente turbolenta, fluttuante, di piccola scala e modellarla in modo opportuno, concentrando l'attenzione sui fenomeni di grande scala che sono direttamente dipendenti dalla geometria considerata.

Le equazioni di Navier-Stokes sono un sistema di tre equazioni di bilancio, ovvero le leggi di conservazione, in cui sono introdotte la legge di Stokes (nel bilancio di quantità di moto) e di Fourier (nel bilancio di energia) per la descrizione di un fluido viscoso. Di seguito è stata utilizzata la notazione reperita in letteratura (Ingason et al., 2015; Society of Fire Protection Engineering, 2016).

All'interno delle equazioni sono indicati i seguenti simboli:

- $\rho$ : densità [ $kg/m^3$ ];
- $t$ : tempo [ $s$ ];
- $x, y, z$ : le coordinate cartesiane [ $m$ ];
- $u, v, w$ : le componenti del vettore velocità [ $m/s$ ];
- $\mu$ : viscosità dinamica del fluido [ $kg/(m\ s)$ ];
- $k$ : conduttività termica [ $W/(m\ K)$ ];
- $g$  è la costante di gravità [ $m/s^2$ ].

Bilancio di massa (Eq. (2.1)):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = S_m \quad \text{Eq. (2.1)}$$

dove:  $S_m = \dot{m}'''_{net}$  è la massa generata e corrisponde a 0 nel caso del moto di un fluido.

Bilancio di quantità di moto (Eq. (2.2)):

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + f + \nabla \cdot \tau \quad \text{Eq. (2.2)}$$

in cui  $p$  è la pressione,  $\tau$  è la parte deviatorica degli sforzi viscosi e  $f$  è la densità delle forze di volume.

Considerando la legge di Stokes, il bilancio può essere espresso con il seguente sistema di equazioni (Eq. (2.3), (Eq. (2.4), (Eq. (2.5)):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_{M,x} \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_{M,y} \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.4)}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_{M,z} \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

dove:

$$S_{M,x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \rho g_x + \sum F_x$$

$$S_{M,y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \rho g_y + \sum F_y$$

$$S_{M,z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \rho g_z + \sum F_z$$

in cui  $F_i$  con  $i = x, y, z$  sono le forze esterne che agiscono sul sistema.

Bilancio di energia (Eq. (2.6)):

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u h) = - \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot q + \varepsilon \quad \text{Eq. (2.6)}$$

in cui  $h$  è l'entalpia specifica [kJ/kg],  $\dot{q}'''$  è flusso di calore attraverso la superficie volumetrica di controllo,  $p$  è la pressione,  $q$  la potenza termica rilasciata e  $\varepsilon$  l'energia di dissipazione.

Considerando la legge di Fourier (Eq. (2.7)):

$$q = -k \nabla T \quad \text{Eq. (2.7)}$$

si ottiene la seguente equazione (Eq. (2.8)):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_h \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.8)}$$

dove:

$$\begin{aligned} S_h = \dot{Q}'''_{net} + \Phi + \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \\ \Phi = \mu \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \\ - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \end{aligned}$$

in cui  $\dot{Q}'''_{net}$  [kJ/kg] è la potenza termica scambiata netta e  $\Phi$  la funzione di dissipazione.

Il sistema è costituito da cinque equazioni e sei incognite, quindi, per renderlo determinato è necessaria un'ulteriore informazione, un'equazione di stato per correlare la pressione  $p$ , all'entalpia  $h$ . Con l'ipotesi di gas perfetto e pressione costante si può tenere conto della seguente relazione (Eq. (2.9)):

$$h = \int_{T_0}^T c_p dT \quad \text{Eq. (2.9)}$$

In questo modo è possibile determinare la temperatura direttamente dalla densità e non considerando le fluttuazioni di pressione anche la soluzione numerica risulta essere più trattabile. Per valutare il fenomeno dell'incendio però è necessario imporre altre ipotesi alle equazioni di bilancio, infatti, occorre considerare la turbolenza dei flussi. Inoltre, le equazioni di conservazione descrivono il trasporto di massa, energia e quantità di moto tenendo conto sia della convezione che della diffusione, poiché la prima rappresenta la principale via di trasporto per il calore e i prodotti di combustione, mentre il processo di diffusione è fondamentale all'interno delle fiamme e nelle interfacce con i solidi. Tuttavia, considerare entrambi i fenomeni all'interno della stessa simulazione richiederebbe un costo computazionale troppo elevato, conseguentemente si utilizzano dei modelli. I modelli più importanti sono quelli di turbolenza. Nelle simulazioni CFD sono attualmente impiegati tre approcci: i modelli RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*), il modello LES (*Large Eddy Simulation*), e il modello DNS (*Direct Numerical Simulation*).

Tra questi modelli, il metodo RANS è il meno accurato e con minor costo computazionale, il LES è più accurato rispetto al RANS ma ha costi computazionali più elevati, il DNS rappresenta quello con maggior accuratezza e maggior costo computazionale

Al fine di comprendere i metodi utilizzati per la modellazione della turbolenza è riportata di seguito una breve descrizione delle caratteristiche dei moti turbolenti.

### **2.3 CARATTERISTICHE DEI MOTI TURBOLENTI**

In fluidodinamica, un moto turbolento è un moto in cui le particelle di fluido si muovono in maniera caotica senza seguire traiettorie ordinate, generando strutture vorticosi instabili di varie dimensioni. Visto che è complesso dare una definizione esatta di turbolenza in letteratura (Andersson, 2011) sono presenti degli studi che forniscono una serie di caratteristiche con le quali descrivere un moto turbolento: irregolarità, diffusività, instabilità per numeri di Reynolds elevati e dissipazione di energia cinetica turbolenta.

1. Irregolarità. I flussi turbolenti sono un processo che parte da vorticosità grandi per poi decadere in strutture sempre più piccole; perciò, vi è un elevato numero di vortici di

grandezza caratteristica differente che porta a moti irregolari e caotici con un'ampia scala di lunghezze, velocità e tempi caratteristici. Le scale maggiori sono dimensionalmente limitate alla geometria del flusso, mentre le scale più piccole dipendono dalla viscosità del fluido.

2. Diffusività. In un moto turbolento c'è un elevato trasporto diffusivo dovuto al movimento caotico all'interno del flusso. Esso permette un'elevata velocità di miscelazione tra le specie, momento ed energia rispetto alla semplice diffusione molecolare. Visto che la turbolenza è un fenomeno in 3D, il trasporto avviene in tutte e tre le dimensioni dello spazio.
3. Instabilità per numeri di Reynolds elevati. I numeri di Reynolds possono essere utilizzati per descrivere i regimi di moto dei fluidi e a seconda del range di valori che assumono permettono di identificare il moto come laminare o turbolento. Si riporta nella Figura 2.2 una rappresentazione istantanea delle vorticosità all'interno di un tubo, con numero di Reynolds crescente.

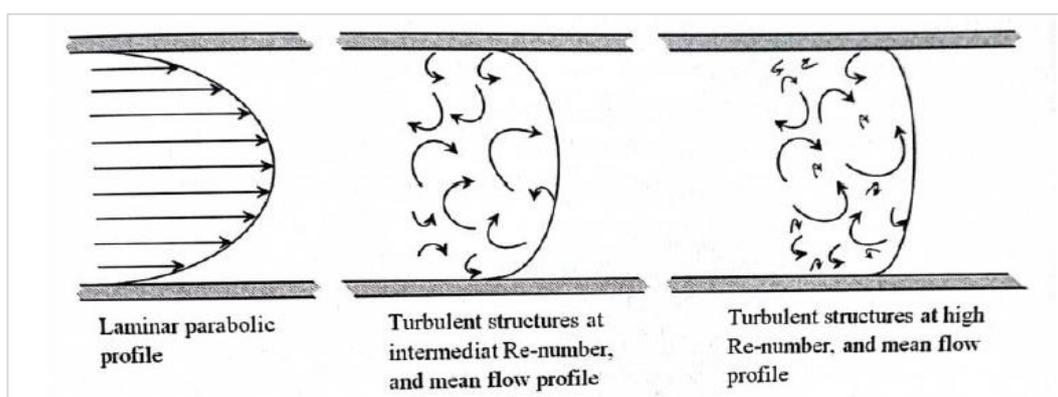


Figura 2.2 Scala della turbolenza del moto di un fluido all'interno di un tubo (Andersson, 2011)

All'aumentare del numero di Reynolds, il profilo di velocità diventa più piatto e la dimensione dei vortici più piccoli cala. L'instabilità della turbolenza aumenta all'aumentare del numero di Reynolds perché la scala temporale per lo smorzamento viscoso diventa molto più grande della scala temporale per il trasporto convettivo; quindi, anche all'interno delle equazioni di Navier-Stokes il termine convettivo diventa molto più importante.

4. Dissipazione di energia cinetica turbolenta. In tutti i flussi turbolenti l'energia viene trasmessa dai vortici maggiori a quelli minori con un processo detto "a cascata" che termina nei vortici più piccoli in una dissipazione di calore dovuta allo stress viscoso. L'energia del processo a cascata ha origine dal trasferimento di energia del moto normale del fluido, che viene trasferita ai vortici di grandi dimensioni; essi essendo instabili si rompono in vortici di dimensioni minori, trasferendo loro energia [Figura 2.3]. Questo processo continua a vortici di scala progressivamente più piccola fino a che l'energia viene dissipata termicamente a causa della viscosità molecolare del fluido.

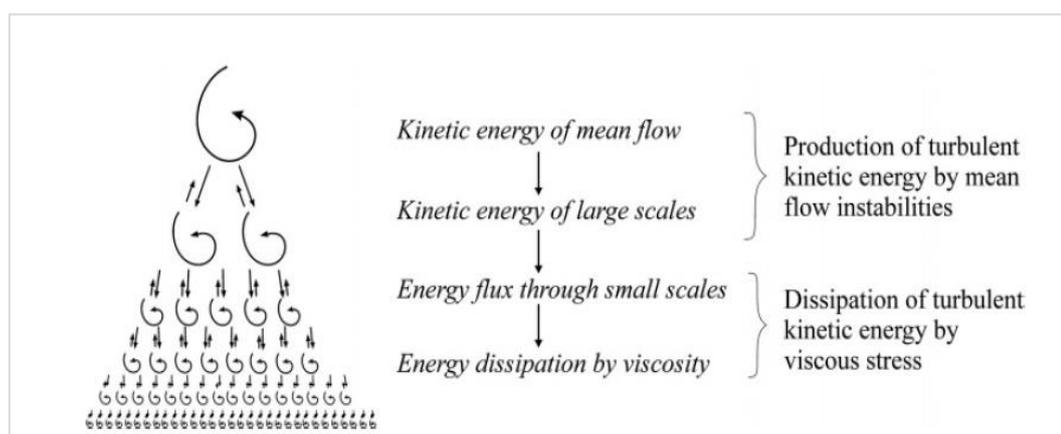


Figura 2.3 Flusso di energia a cascata (Andersson, 2011)

## 2.4 MODELLAZIONE DELLA TURBOLENZA

### 2.4.1 MODELLO RANS – REYNOLDS AVERAGED NAVIER STOKES

Nel modello RANS l'obiettivo è di risolvere l'andamento medio del flusso, dipendente dalla geometria in esame, evitando di risolvere in maniera diretta la sua componente fluttuante attribuibile alle scale più piccole della turbolenza. Infatti, il comportamento delle scale più piccole può essere considerato universale e quindi ricavabile attraverso un modello opportuno. Le grandezze sono mediate in un certo intervallo di tempo, sufficientemente piccolo rispetto ai fenomeni che si vogliono seguire e sufficientemente grande rispetto ai disturbi della turbolenza. Così facendo i tempi di calcolo vengono notevolmente ridotti poiché le scale del moto medio risultano essere notevolmente maggiori di quelle del moto turbolento. Per ricavare le equazioni RANS viene applicata la decomposizione di Reynolds alle

quantità presenti all'interno delle equazioni di Navier-Stokes, cioè le quantità sono divise in due componenti: una componente media ( $\bar{\varphi}$ ) e una componente fluttuante ( $\varphi'$ ). Perciò si ha in ogni istante:  $\varphi = \bar{\varphi} + \varphi'$ . Le componenti sono in funzione del tempo e nelle simulazioni d'incendio la componente media ha un ordine di grandezza di qualche secondo, mentre la componente che indica le fluttuazioni è nell'ordine di millisecondi. Le equazioni di Navier-Stokes sono modificate come di seguito (Eq. (2.10), Eq. (2.11), Eq. (2.12)).

Bilancio di massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \bar{u} = -\nabla \cdot (\rho \bar{u}') \quad \text{Eq. (2.10)}$$

Bilancio di quantità di moto:

$$\frac{\partial (\rho \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + f + \nabla \cdot \bar{\tau} - \nabla \cdot (\rho \bar{u}' u') \quad \text{Eq. (2.11)}$$

Bilancio di energia:

$$\frac{\partial (\rho \bar{h})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{h}) = -\frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \bar{q} + \bar{\varepsilon} - \nabla \cdot \rho \bar{u}' h' \quad \text{Eq. (2.12)}$$

Nelle equazioni RANS per i flussi turbolenti sono presenti dei termini aggiuntivi sul lato destro delle equazioni, che all'interno dell'equazioni del momento sono chiamati *stress di Reynolds* e rappresentano l'effetto del trasporto turbolento sul flusso, come aumento della diffusività e della miscelazione all'interno di flussi turbolenti. Quindi, visto che il sistema presenta un numero di incognite maggiore, per renderlo determinato, si utilizzano diversi modelli che hanno lo scopo di correlare questi termini turbolenti con i valori medi del moto del fluido. Questi modelli vengono classificati in base al numero di equazioni aggiuntive che introducono in *zero, one, two equations models*. In particolare, molti modelli che utilizzano l'approccio RANS utilizzano una viscosità di turbolenza per chiudere il set di equazioni. L'idea base è quella

di modellare le fluttuazioni irrisolte con termini diffusivi che rappresentano la dissipazione di energia per turbolenza (Eq. (2.13), Eq. (2.14)):

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad \text{Eq. (2.13)}$$

in cui  $\delta_{ij}$  è il delta di Kronecker:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } i = j \\ 0 & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3.$$

$$\overline{\rho u'_j h'} = \lambda_t \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} \quad \text{Eq. (2.14)}$$

dove  $\mu_t$  è la viscosità turbolenta,  $k$  è l'energia cinetica e  $\lambda_t$  la diffusività turbolenta.  $\lambda_t$  è correlata alla viscosità turbolenta tramite l'espressione (Eq. (2.15)):

$$\lambda_t = \frac{\mu_t}{\sigma_t} \quad \text{Eq. (2.15)}$$

dove  $\sigma_t$  è il numero di Prandtl o di Schmidt a seconda che la quantità scalare sia una variabile energetica o di specie.

Per le simulazioni di analisi degli incendi, il modello comunemente usato è a due equazioni. Il modello a due equazioni maggiormente applicato è il k- $\epsilon$  model. In questo caso sono risolte due equazioni addizionali: una per il termine turbolente dell'energia cinetica  $k$  e l'altro per il rateo di dissipazione  $\epsilon$ . Queste quantità costituiscono la viscosità turbolenta (Eq. (2.16)):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{Eq. (2.16)}$$

dove il fattore  $C_\mu$  è una costante empirica.

I termini  $k$  e  $\epsilon$  assicurano che l'effetto della stratificazione nei gas caldi e i gradienti termici destabilizzanti nei pennacchi di fumo in crescita siano adeguatamente descritti. La limitazione del modello RANS è rappresentata dai flussi vorticosi con separazione di flussi, poiché la turbolenza modellata è ipotizzata isotropica.

#### 2.4.2 MODELLO LES – LARGE EDDY SIMULATION

La derivazione del modello LES è molto simile a quella dei modelli RANS anche se con la differenza sostanziale che il modello RANS si basa sulla decomposizione delle variabili con valori mediati rispetto al tempo, mentre nel modello LES i valori sono mediati rispetto allo spazio. Anche il modello LES utilizza la viscosità di turbolenza, ma la differenza fondamentale è nell'ordine di grandezza della viscosità. Con il modello LES, si tenta di risolvere il campo di flusso su una griglia con il minor numero di celle: quindi le strutture del moto, come i vortici, possono estendersi solo su poche celle della griglia. Per ottenere questo risultato, la viscosità di turbolenza deve essere abbastanza piccola da evitare di appianare i piccoli vortici, ma abbastanza grande da garantire stabilità numerica e tenere conto della dissipazione di energia nelle scale della sotto griglia. La soluzione adottata dal modello è quella di filtrare le equazioni in modo da risolvere direttamente il flusso medio e i vortici più grandi e utilizzare dei sotto modelli solo per stimare i vortici più piccoli.

Il vantaggio del modello LES è che non ci sono equazioni aggiuntive da essere risolte e la dinamica dell'incendio è catturata nella simulazione rendendo in modo più realistico il campo di flusso rispetto al modello RANS che media le variabili nel tempo. Nel modello LES è necessario prestare attenzione alla scelta della griglia numerica perché l'accuratezza della tecnica può notevolmente calare se non ci sono abbastanza celle per descrivere il campo di flusso.

Solitamente, almeno l'80% dell'energia cinetica turbolenta viene risolta dalle equazioni filtrate, mentre il restante 20% viene risolto dai modelli di sotto-griglia. Se invece l'energia cinetica turbolenta risolta è inferiore all'80%, il LES viene classificato come VLES (*Very Large Eddy Simulation*). I modelli LES utilizzano espliciti filtri per separare i piccoli vortici e l'operazione di filtraggio spaziale può essere espressa come segue (Eq. (2.17)):

$$\hat{\varphi}(x, t) = \int_{\Delta} \varphi(r, t) G(|x - r|) dr \quad \text{Eq. (2.17)}$$

dove  $G$  è la funzione filtro e  $\Delta$  è lo spessore di filtraggio che è generalmente uguale allo spessore delle celle della *mesh*. In questo modo è possibile separare le vorticosità di dimensioni maggiori o uguali alla *mesh* che verranno risolte dalle equazioni filtrate e le vorticosità inferiori che verranno lasciate ai modelli di sotto-griglia. Le più comuni funzioni filtro includono: la funzione filtro *Top hat*, la funzione filtro di Gauss e la funzione filtro di Fourier Cut-Off.

I modelli di sotto-griglia comunemente utilizzati possono includere il modello di Smagorinsky, i modelli dinamici e altri. All'interno di FDS è utilizzato il modello Smagorinsky, in cui i vortici di turbolenza sono assunti isotropici. Gli stress sono modellati come segue (Eq. (2.18)):

$$\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j} = -2\mu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad \text{Eq. (2.18)}$$

dove  $\bar{S}_{ij}$  è il tensore di deformazione (Eq. (2.19)):

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\partial \bar{u}_n}{\partial x_n} \delta_{ij} \quad n = 1, 2, 3, \quad \text{Eq. (2.19)}$$

in cui  $\delta_{ij}$  è il delta di Kronecker:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{per } i = j \\ 0 & \text{per } i \neq j \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3.$$

La viscosità turbolenta è definita come segue (Eq. (2.20)):

$$\mu_{SGS} = \rho (C_s \Delta)^2 \left[ 2\bar{S}_{ij} \cdot \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial \bar{u}_n}{\partial x_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. (2.20)}$$

dove  $C_s$  è il coefficiente di Smagorinsky, compreso tra 0.065 e 0.3, impostato pari a 0.2 all'interno di FDS e  $\Delta$  è pari a  $(\delta_x \delta_y \delta_z)^{\frac{1}{3}}$  in cui  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  sono le lunghezze delle celle della griglia. Perciò intrinsecamente questo tipo di modello è dipendente dalle dimensioni della griglia anche se per le grandezze studiate nelle tipiche applicazioni ingegneristiche, questo parametro è sufficientemente trascurabile e i risultati ottenuti da simulazioni con griglie diverse possono essere coincidenti. A differenza della viscosità turbolenta introdotta all'interno del modello RANS, questa viscosità non agisce come fattore correttivo per la turbolenza dell'intero flusso, ma agisce solo per le scale non risolte, visto che gran parte della turbolenza viene risolta direttamente con le equazioni filtrate. Di conseguenza essa risulta essere molto più piccola di quella introdotta dai modelli RANS.

### 2.4.3 DNS – DIRECT NUMERICAL SIMULATION

Il DNS risolve numericamente le equazioni di Navier-Stokes senza utilizzare nessun modello per rappresentare la turbolenza, simulando allo stesso tempo sia i vortici più grandi che quelli più piccoli. Per questo motivo la dimensione delle celle elementari che compongono la *mesh* deve essere inferiore al più piccolo vortice presente all'interno del flusso. Il numero di celle richieste nelle simulazioni 3D aumenta con una potenza di 9/4 all'aumentare del numero di Reynolds. Infatti, per numeri di Reynolds più elevati anche la differenza tra la dimensione dei vortici più piccoli e quelli più grandi è maggiore e aumenta il numero di celle richieste. La necessità di risolvere tutto il range di turbolenza comporta un elevatissimo costo computazionale che aumenta in particolare con il cubo del numero di Reynolds e con il quadrato del numero di Schmidt ( $t \propto Re^3 Sc^2$ ). Il numero di Schmidt è definito come il rapporto tra la diffusività cinematica e la diffusività di materia ( $Sc = \frac{\nu}{D_m}$ ) e vale circa 1 per i gas, mentre può arrivare anche ad un ordine di grandezza di  $10^6$  per i liquidi più viscosi. Per questo motivo, il metodo DNS deve essere limitato a simulazioni con flussi debolmente turbolenti come piccole fiamme laminari e piccoli getti turbolenti. Per tali motivazioni non è quindi utilizzato per applicazioni pratiche ingegneristiche ma piuttosto come strumento di ricerca.

## **2.5 CARATTERISTICHE DI FDS (FIRE DYNAMICS SIMULATOR)**

FDS, il software utilizzato per la modellazione, risolve numericamente le equazioni di Navier-Stokes per i fluidi a basse velocità e per moti prevalentemente guidati da effetti termici con un' enfasi particolare sul trasporto di fumi e calore per descrivere l'evoluzione degli incendi. Al suo interno la turbolenza può essere trattata scegliendo di impostare il modello LES e le sue varianti, mentre il metodo DNS può essere implementato solamente con *mesh* molto fini, ma a causa degli elevati tempi di calcolo non viene quasi mai utilizzato. Le varianti del modello LES, VLES (Very Large Eddy Simulation) e SVLES (Simple Very Large Eddy Simulation), sono dei modelli più approssimati, al fine di ridurre il costo computazionale; in cui è minore la percentuale di turbolenza direttamente calcolata e maggiore quella approssimata dai sotto-modelli.

FDS è un software gratuito rilasciato per la prima volta nel febbraio del 2000 dal NIST dell'United States Department of Commerce in cooperazione con il VTT Technical Research Center of Finland. Circa metà delle applicazioni del software sono state dedicate alla progettazione e alla verifica dei dispositivi di evacuazione fumo e calore, mentre l'altra metà permette la ricostruzione di incendi reali a fini investigativi. Per tale motivo il software è stato utilizzato all'interno dell'elaborato per la ricostruzione dell'incendio sviluppato durante le prove sperimentali in modo tale da poter studiare le dinamiche fondamentali dell'incendio e della combustione della merce.

Il software è basato su un linguaggio Fortran che legge i parametri di input su un file di testo, calcola una soluzione numerica delle equazioni e fornisce un file di output con i risultati. Pertanto, è necessario conoscere i dati di input da fornire e la struttura con la quale essi devono essere posti per ottenere la modellazione desiderata.

FDS di default utilizza una griglia di calcolo in coordinate cartesiane; quindi sono permesse esclusivamente geometrie rettangolari e ogni geometria di tipo diverso viene approssimata a rettangoli in relazione alla griglia di calcolo; ma la griglia può essere impostata anche in 2D e

in coordinate cilindriche e conseguentemente gli oggetti potranno essere costruiti secondo la griglia impostata.

La scelta della dimensione della griglia è fondamentale all'interno del modello perché essa determina il costo computazionale e l'accuratezza della soluzione. Spesso è conveniente utilizzarne più di una, infatti, questo permette di descrivere le regioni del dominio di calcolo con un'accuratezza differente secondo le necessità e inoltre ogni griglia può essere associata ad un processore diverso in modo da dividere i costi computazionali su più processori e ridurre il tempo di calcolo. In questo caso la simulazione viene svolta in parallelo.

### 2.5.1 PYROSIM

Per lo svolgimento del lavoro di tesi è stato utilizzato anche il programma PyroSim, un'interfaccia grafica per il software FDS sviluppata da Thunderhead Engineering creata per semplificare l'inserimento degli input all'interno di FDS. Infatti, attraverso Pyrosim è possibile importare geometrie complesse realizzate su file di AutoCAD e il programma permette di visualizzare direttamente la struttura geometrica e modificare i dati in modo più rapido. PyroSim è stato utilizzato per modellare la geometria della pila di bancali e le *mesh*, senza dover valutare le coordinate spaziali di ciascun oggetto che in questo modo vengono trascritte direttamente sul file di testo ad esso integrato.

### 3. PROVE SPERIMENTALI

In questo capitolo viene presentato il lavoro svolto sulle prove sperimentali per l'ottenimento della curva di potenza termica rilasciata, utilizzata per definire gli input principali dell'analisi antincendio di un magazzino di merce di materiale plastico, finalizzata al raggiungimento degli obiettivi normativi imposti dal Codice di Prevenzione Incendi. Sulla base dei dati disponibili dalle prove, costituite dal video dell'incendio appiccato, è stata ottenuta l'altezza di fiamma e da essa è stata calcolata la curva HRR e classificata la curva di sviluppo dell'incendio.

La prova d'incendio è stata effettuata appiccando il fuoco su una pila di bancali contenenti la merce da depositare all'interno del magazzino. Si tratta di sedie e tavoli da giardino in polipropilene all'interno di scatole di cartone con percentuali di imballaggio di legno e film di plastica. Il *fire-test* è stato effettuato in scala reale, ricostruendo la configurazione tipica di stoccaggio, una pila costituita da 8 bancali, 4 sopra e 4 sotto su *pallets* di legno. L'ignizione dei materiali è avvenuta mediante una fiamma pilota, attraverso una torcia alimentata a GPL, tenuta fissa alla base dei bancali.

#### 3.1 CURVA DI POTENZA TERMICA RILASCIATA

Dal video è stato possibile ricavare, anche se con un margine di incertezza di qualche centimetro o decina di centimetri, l'altezza della fiamma raggiunta dall'incendio, poi è stata determinata la curva HRR, tramite la seguente relazione (Eq. (3.1)), reperita in letteratura (NFPA 921 Guide for Fire and Explosion Investigations, 2001):

$$Q = 79.18 \frac{H_f^{\frac{5}{2}}}{k} \quad \text{Eq. (3.1)}$$

dove:

$Q$  è la potenza termica rilasciata dal combustibile (kW)

$H_f$  è l'altezza di fiamma (m)

$k$  è il fattore effetto di parete e può assumere i seguenti valori:

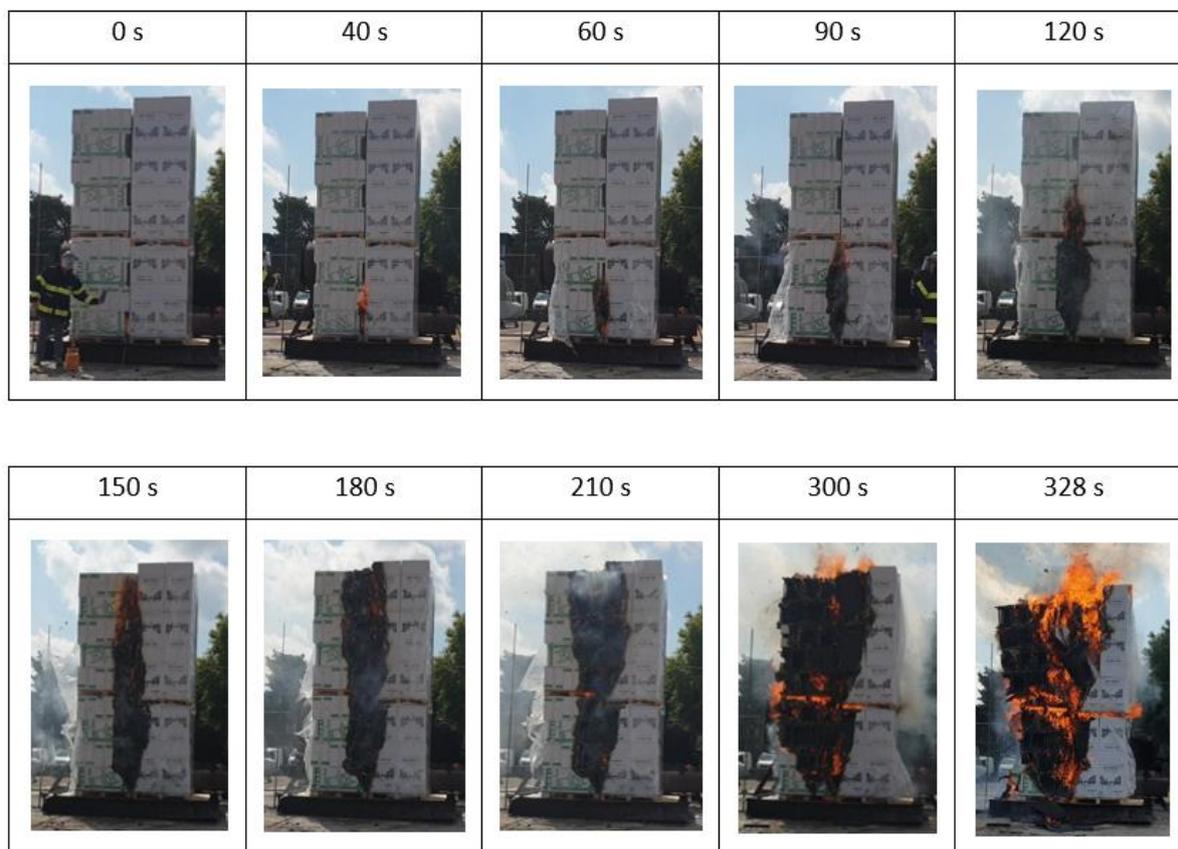
$k = 1$  se l'incendio non è vicino a pareti;

$k = 2$  se l'incendio è vicino a pareti;

$k = 4$  se l'incendio si sviluppa in un angolo.

Pertanto, valutando un incendio all'aperto, il valore di  $k$  considerato è pari a 1.

Il calcolo della potenza termica è stato possibile fino al momento del crollo della pila, istante da cui l'altezza di fiamma non è più determinabile. In Figura 3.1 sono riportate le foto dell'incendio a partire dal momento in cui viene posto l'innesco fino al momento del crollo della pila a 328 secondi. L'innesco è stato rimosso dopo circa 40 secondi.



*Figura 3.1 Foto dell'incendio nei vari istanti del test*

In Figura 3.2 viene riportata la curva HRR.

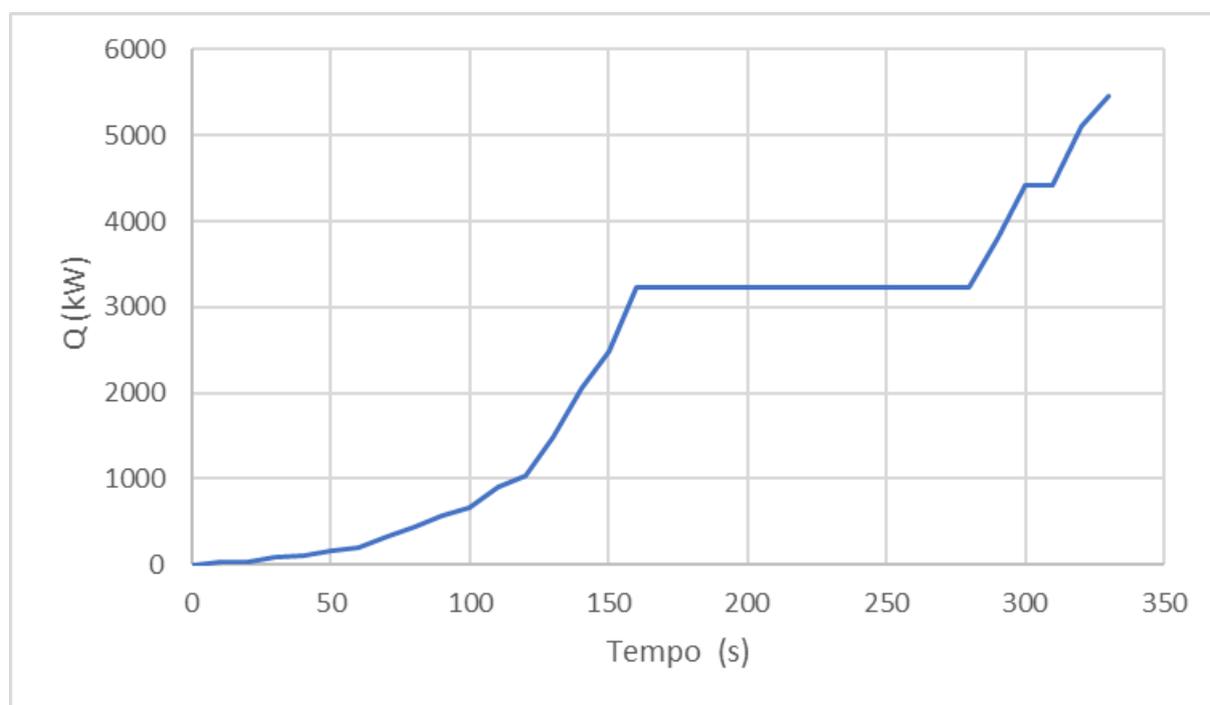


Figura 3.2 Curva HRR calcolata tramite la normativa NFPA 921

La curva presenta un andamento inizialmente crescente in cui la potenza termica aumenta in modo sempre più rapido, poi assume un tratto costante e infine tende a crescere nuovamente fino al crollo della pila. Durante il primo tratto l'altezza della fiamma aumenta per il quantitativo sempre maggiore di materiale che inizia a bruciare, poi raggiunta la lunghezza dell'intera pila, per un intervallo di tempo la sua altezza rimane costante e si ha un allargamento orizzontale della fiamma. Ciò determina il tratto costante all'interno della curva HRR. Successivamente la fiamma tende a crescere al di sopra dei bancali e la potenza termica assume un andamento nuovamente crescente, fino al raggiungimento del crollo dei bancali che porta alla caduta della fiamma e quindi all'impossibilità di continuare a determinare la potenza termica dell'incendio. Il valore dell'altezza di fiamma raggiunta al momento del crollo è pari a 5.44 m da terra a cui corrisponde una potenza termica rilasciata di 5468 kW.

### 3.2 RATEO DI CRESCITA

Per classificare la curva di sviluppo dell'incendio è stato determinato il rateo di crescita. Per valutare ciò è stato considerato solo il primo tratto della curva, in modo da evitare di considerare l'intervallo di tempo in cui l'altezza di fiamma rimane costante ed avere una stima più significativa dell'andamento. Per confrontare l'andamento di crescita ottenuto con le equazioni caratteristiche presenti in letteratura, riportate nella Tabella 1.2, è necessario assumere una forma dell'equazione polinomiale del tipo:  $HRR = \alpha \cdot t^2$  (Eq. (1.4)) dove  $\alpha$  deve essere determinato.

La costante è stata ottenuta attraverso il metodo dei minimi quadrati: per ogni istante è stata calcolata la differenza tra il valore della potenza termica sperimentale e quella calcolata tramite l'equazione con un valore di  $\alpha$  di primo tentativo; ottenuta la somma di tutte le differenze in valore assoluto, è stata iterata la costante fino ad ottenere la somma minore possibile. Il valore di  $\alpha$  ottenuto risulta essere pari a  $0.0882 \text{ kJ/s}^3$ , un valore intermedio tra le costanti del *fast* ( $0.0444 \text{ kJ/s}^3$ ) e dell'*ultrafast* ( $0.1778 \text{ kJ/s}^3$ ). L'andamento di crescita dei dati sperimentali è quindi esprimibile, anche se in modo molto approssimato, dall'equazione:  $HRR = 0.0882 \frac{\text{kJ}}{\text{s}^3} \cdot t^2$ . Graficando le equazioni sopra citate, si nota che l'andamento di crescita ottenuto dalla prova sperimentale è situato inizialmente appena al di sotto della curva caratteristica dell'incendio *fast*, mentre crescendo si pone tra le due curve di incendio di tipo *fast* e *ultrafast* come mostrato in Figura 3.3.

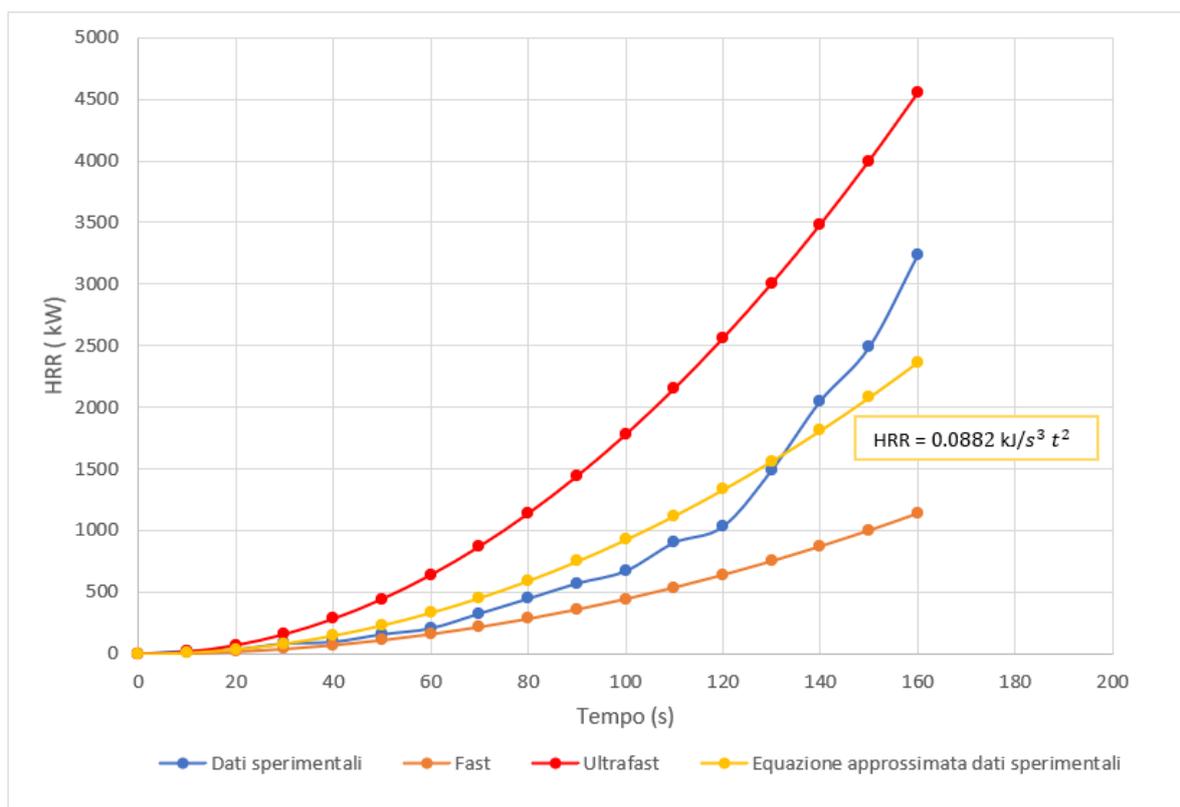


Figura 3.3 Confronto tra l'andamento di crescita determinato e quelli caratteristici per gli incendi fast e ultrafast

### 3.3 LIMITI DELL'APPROCCIO

I risultati ottenuti utilizzando la normativa NFPA 921 presentano alcune incertezze e limitazioni, sia in relazione all'estrapolazione dei dati ricavati dal *fire-test*, sia per la semplificazione dovuta all'utilizzo dell'equazione.

Una prima incertezza è rappresentata dalla misura dell'altezza di fiamma nei vari istanti del video. L'altezza, infatti, è stata determinata valutando il livello della fiamma raggiunto sulla superficie esposta, approssimando le oscillazioni esistenti per sua natura ad un unico valore e non considerando il livello raggiunto all'interno dei bancali, che non può essere visibile. Inoltre, l'altezza può essere influenzata dalle condizioni del vento che il giorno del *fire-test* hanno portato a far bruciare maggiormente la parte sinistra della pila.

L'equazione utilizzata presenta invece diverse limitazioni dovute alla sua applicabilità. Essa, infatti, mette in relazione la potenza termica rilasciata in funzione dell'altezza di fiamma che si crea sulla superficie di un solido, ma nel caso oggetto di studio è stata applicata approssimando l'altezza di fiamma a quella che si estende verticalmente sull'intero solido, a causa della geometria della pila. In questo modo quindi l'altezza di fiamma risulta essere influenzata dalla dimensione e dalla geometria dei bancali, che influenzano a loro volta la curva di potenza termica. Inoltre, all'interno della formula non c'è nessun riferimento alla tipologia di materiale coinvolto, di cui si tiene conto soltanto tramite il valore incerto dell'altezza di fiamma.

Pertanto, l'equazione utilizzata, considerando un'altezza di fiamma più elevata, fornisce una stima approssimata e conservativa della curva di potenza termica rilasciata, che rappresenta una indicazione sufficiente per il tipo di approccio utilizzato nel progetto seguito durante il tirocinio, ma che non corrisponde a una descrizione realistica dell'incendio.

## **4. ANALISI DEI MODELLI DISPONIBILI PER LA SIMULAZIONE**

In questo capitolo sono analizzate le varie possibilità fornite dal software FDS per descrivere lo sviluppo dell'incendio nel modo più realistico possibile. Infatti, sono presentati i diversi modelli con i quali approcciare i vari aspetti incontrati durante il processo di modellazione. In particolare, vengono descritti i due approcci alternativi presenti per il processo di pirolisi e per la reazione di combustione e i modelli utilizzati dal software per tenere conto del trasferimento di calore.

### **4.1 MODELLI DI PIROLISI**

I modelli di pirolisi hanno l'obiettivo di simulare il rilascio di gas combustibile dalle superfici solide presenti nel dominio, soggette a tale fenomeno. Per modellare la pirolisi ci sono due tipi di approccio: il modello di pirolisi semplice o il modello di pirolisi complessa. Nel primo caso non è necessaria l'analisi dei fenomeni che si verificano durante l'incendio, perché la portata di gas combustibile rilasciata dalla superficie del solido viene calcolata a partire dalla curva di potenza termica rilasciata, che deve essere impostata come dato di input; per il secondo caso invece è necessario svolgere un'analisi delle reazioni chimiche che avvengono durante l'incendio e la pirolisi è simulata sulla base dei parametri inseriti.

#### **4.1.1 MODELLO DI PIROLISI SEMPLICE**

Il modello di pirolisi semplice può essere utilizzato quando si hanno informazioni limitate sul materiale ed è nota la curva di potenza termica rilasciata dall'incendio. Infatti, in questo caso la massa di combustibile rilasciato viene calcolata a partire dalla curva HRR, come specificato dalla seguente equazione (Eq. (4.1)) reperita in letteratura (McGrattan, Hostikka, Floyd, McDermott, & Vanella, 2022) :

$$\dot{m}_f'' = \frac{f(t)\dot{q}''_{user}}{\Delta H_C} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

in cui  $f(t) \dot{q}''_{user}$  è la potenza termica rilascia per unità di area in funzione del tempo e  $\Delta H_C$  il calore di combustione del gas; perciò,  $\dot{m}''_f$  rappresenta il flusso di gas combustibile per unità di area.

Per calcolare la massa rilasciata da un solido, costituito da più materiali che hanno diverso calore di combustione  $\Delta H_{C,solid}$ , considerando un'unica reazione, FDS aggiusta  $\dot{m}''_f$  in modo da ottenere l'appropriato flusso di massa dal solido (Eq. (4.2)):

$$\dot{m}''_{f,solid} = \dot{m}''_f \frac{\Delta H_C}{\Delta H_{C,solid}}. \quad \text{Eq. (4.2)}$$

Il modello di pirolisi semplice è utilizzato se l'intento è di modellare uno scenario d'incendio avendo già nota la curva di potenza termica rilasciata, ma all'interno dell'elaborato l'obiettivo è di ottenere una nuova curva HRR derivante della modellazione; perciò, questo tipo di approccio non può essere utilizzato.

#### 4.1.2 MODELLO DI PIROLISI COMPLESSA

Con il modello di pirolisi complessa si sfrutta la capacità del software, assegnate le proprietà dei materiali, di simulare lo sviluppo dell'incendio basandosi sui fenomeni fisici e chimici. Le proprietà dei materiali in questo caso non vengono utilizzate dal software solo per valutare il trasferimento di calore e le temperature, come nel modello di pirolisi semplice, ma anche per la determinazione della curva di potenza termica rilasciata. Per poter inserire le proprietà necessarie alla modellazione è bene capire i processi che si verificano durante l'incendio e quali parametri sono richiesti dal software. I combustibili solidi sottoposti ad elevate temperature si degradano tramite la reazione di pirolisi e i gas prodotti reagiscono con l'ossigeno dando origine alla combustione; perciò, di seguito è analizzata la modellazione di questi due fenomeni. L'obiettivo del modello è quantificare la massa di gas combustibile che si forma, da cui avrà poi origine la reazione di combustione e lo sviluppo dell'incendio. Ciò può essere determinato analizzando come evolve nel tempo la massa per unità di volume del materiale solido.

Considerando un componente di materiale  $\alpha$  in fase solida, la massa per unità di volume  $\rho_{s,\alpha}$  ( $x,t$ ) in accordo con l'equazione di conservazione delle specie è (Eq. (4.3)):

$$\frac{\partial \rho_{s,\alpha}}{\partial t} = - \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha}} r_{\alpha\beta} + S_{\alpha} \quad \text{Eq. (4.3)}$$

dove  $N_{r,\alpha}$  è il numero di reazioni per il materiale  $\alpha$ ,  $r_{\alpha\beta}$  è la velocità della reazione  $\beta$  in unità di 1/s e  $S_{\alpha}$  è la velocità di produzione del componente  $\alpha$  come risultato di reazioni di altri componenti. Il primo termine ( $-\sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha}} r_{\alpha\beta}$ ) è negativo perché il materiale  $\alpha$  viene consumato attraverso le reazioni  $\beta$ , mentre il secondo ( $S_{\alpha}$ ) è positivo, perché il materiale  $\alpha$  può essere prodotto a partire da altri materiali.

In generale, la velocità di reazione  $r_{\alpha\beta}$  è funzione sia della fase solida che gassosa e sono calcolate come combinazione della funzione di Arrhenius e altre funzioni (Eq. (4.4)):

$$r_{\alpha\beta} = \underbrace{\rho_{s,\alpha}^{n_{s,\alpha\beta}}}_{1} \cdot \underbrace{A_{\alpha\beta} \exp\left(-\frac{E_{\alpha\beta}}{RT_s}\right)}_{2} \cdot \underbrace{[X_{O_2}(x)]^{n_{O_2,\alpha\beta}}}_{3} \cdot \underbrace{T_s^{n_{t,\alpha\beta}}}_{4} \quad \text{Eq. (4.4)}$$

dove:

- il primo termine descrive la dipendenza della velocità di reazione dalla concentrazione del reagente con  $n_{s,\alpha\beta}$  che è l'ordine di reazione parziale di  $\alpha$ ;
- il secondo termine è la funzione di Arrhenius che descrive la dipendenza della velocità di reazione dalla temperatura del materiale  $T_s$  dove  $A_{\alpha\beta}$  è il fattore pre-esponenziale ed  $E_{\alpha\beta}$  l'energia di attivazione;
- il terzo termine è utilizzato per descrivere la dipendenza dalla concentrazione locale di ossigeno ed  $n_{O_2,\alpha\beta}$  è l'ordine di reazione parziale dell'ossigeno;
- il quarto termine è una funzione della temperatura del solido, mentre l'esponente  $n_{t,\alpha\beta}$  è l'esponente che descrive la dipendenza dalla temperatura.

Il profilo della concentrazione di ossigeno dipende dalla competizione tra la diffusione e il consumo dovuto alla reazione. Visto che FDS non risolve il trasporto delle specie gassose all'interno dei materiali, è assunto un profilo esponenziale di concentrazione (Eq. (4.5)):

$$X_{O_2}(x) = X_{O_{2,g}} \exp\left(\frac{-x}{L_{g,\alpha\beta}}\right) \quad \text{Eq. (4.5)}$$

in cui  $L_{g,\alpha\beta}$  è la profondità caratteristica alla quale l'ossigeno può essere presente nel materiale e deve essere fornita dall'utente e  $x$  è la profondità a cui la concentrazione è misurata.

Il secondo termine  $S_\alpha$  nell'equazione Eq. (4.3) di conservazione della specie è la somma di tutte le reazioni di altri materiali in cui il residuo che si forma è il componente  $\alpha$  (Eq. (4.6)):

$$S_\alpha = \sum_{\alpha'=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha'}} \nu_{\alpha,\alpha'\beta} r_{\alpha'\beta} \quad \text{Eq. (4.6)}$$

dove  $r_{\alpha'\beta}$  è la velocità di reazione del materiale  $\alpha'$  da cui attraverso la reazione  $\beta$  si forma il residuo  $\alpha$  e  $\nu_{\alpha,\alpha'\beta}$  è il rapporto tra i coefficienti stechiometrici del materiale di  $\alpha$  e del materiale  $\alpha'$  nella reazione  $\beta$ .

Il tasso di produzione volumetrica per ogni specie gassosa  $\gamma$  è (Eq. (4.7)):

$$\dot{m}'''_\gamma = \sum_{\alpha=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha}} \nu_{\gamma,\alpha\beta} r_{\alpha\beta} \quad \text{Eq. (4.7)}$$

dove  $\nu_{\gamma,\alpha\beta}$  è il rapporto tra i coefficienti stechiometrici della specie gassosa  $\gamma$  e del materiale  $\alpha$  nelle reazioni  $\beta$ .

All'interno del software la modellazione dei solidi che subiscono reazioni chimiche avviene sempre sotto le seguenti ipotesi semplificative:

- il rilascio delle specie gas è istantaneo;
- c'è equilibrio termico locale tra il solido e i componenti gassosi;
- non c'è condensazione;
- non ci sono effetti legati alla porosità.

Perciò se si assume che i gas sono trasportati istantaneamente sulla superficie attraverso lo spessore  $L$ , il flusso di massa per unità di superficie è (Eq. (4.8)):

$$\dot{m}''_{\gamma} = \int_0^L \dot{m}'''_{\gamma}(x) dx \quad \text{Eq. (4.8)}$$

Per ricavare la relazione sul flusso di massa di gas combustibile prodotto è stata descritta l'equazione per la velocità di reazione in termini generali, mentre per la reazione di pirolisi ci sono delle semplificazioni. Infatti, il terzo termine dell'equazione Eq. (4.4) è utilizzato per tenere conto della concentrazione di ossigeno che influenza le reazioni di ossidazione, ma la reazione di pirolisi avviene senza interazione con l'ossigeno; quindi, questo termine si può omettere considerando l'esponente  $n_{O_2, \alpha\beta}$  pari a 0.

All'interno del software l'equazione di conservazione delle specie viene riformulata valutando la densità del componente  $\alpha$  sulla densità totale al tempo iniziale  $\rho_s(0)$  (Eq. (4.9)), perciò anche la velocità di reazione viene riformulata nel seguente modo (Eq. (4.10)):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_s(0)} \right) = - \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha}} r_{\alpha\beta} + S_{\alpha} \quad \text{Eq. (4.9)}$$

$$r_{\alpha\beta} = \left( \frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_s(0)} \right)^{n_{s,\alpha\beta}} A_{\alpha\beta} \exp \left( - \frac{E_{\alpha\beta}}{RT_s} \right) T_s^{n_{t,\alpha\beta}} \quad \text{Eq. (4.10)}$$

Le costanti cinetiche  $A_{\alpha\beta}$  ed  $E_{\alpha\beta}$  tipicamente non sono disponibili per molti materiali, perciò all'interno di FDS è possibile specificare, anziché  $A_{\alpha\beta}$  ed  $E_{\alpha\beta}$ , l'insieme dei parametri derivanti dall'analisi termo-gravimetrica (TGA) da cui  $A_{\alpha\beta}$  e  $E_{\alpha\beta}$  possono essere poi ricavati. Si tratta della temperatura alla quale il materiale si decompone alla sua massima velocità, la rampa di

riscaldamento alla quale l'analisi è stata svolta e il range di pirolisi, ovvero l'intervallo di temperature all'interno del quale avviene la reazione di pirolisi.

Per descrivere il processo di pirolisi oltre ai parametri è necessario impostare l'entalpia di reazione e nel caso di più componenti o materiali specificare anche l'entalpia di combustione.

L'entalpia di reazione è la variazione di entalpia associata ad una reazione chimica. Visto che la maggior parte delle reazioni di pirolisi sono endotermiche, essa rappresenta l'energia termica consumata, per unità di massa di reagente che si converte nei prodotti. In termini generali può essere calcolata tramite la differenza di entalpia di formazione dei prodotti e dei reagenti in condizioni standard:

$$\Delta H_r^0 = \sum_{\text{prodotti}} \nu \Delta H_f^0 - \sum_{\text{reagenti}} \nu \Delta H_f^0$$

dove  $\nu$  rappresenta i coefficienti stechiometrici.

L'entalpia di combustione rappresenta invece l'energia rilasciata per unità di massa di gas combustibile durante il processo di combustione e non ha nulla a che vedere con il processo di pirolisi, ma è bene specificarla, perché se ci sono più materiali che producono gas combustibile, in questo modo FDS riesca a tenere conto di tutti i contributi e calcolare la corretta massa rilasciata di gas combustibile e conseguentemente assicurare la corretta curva HRR.

Una volta iniziato il processo di pirolisi, i gas combustibili, in presenza dell'innesco, possono dare origine alla reazione di combustione. Questo processo ha una durata di tempo ben definita; infatti, un solido continua a fornire gas combustibile solo fintanto che tutta la sua massa non è consumata e ciò dipende dallo spessore, dalla densità e dalle velocità di reazione dei materiali. Questo fenomeno può essere visualizzato attraverso il valore della densità di bulk, di seguito definita. All'interno del software un materiale solido è caratterizzato da diversi tipi di densità. Infatti, è necessario distinguere tra la densità del materiale, sempre costante,

la densità di bulk rappresentata dalla massa del materiale sul volume di solido e la densità del solido rappresentata dalla somma delle densità di bulk di tutti i materiali presenti [Tabella 4.1].

Densità del materiale	$\rho_{\alpha} = \frac{m_{\alpha}}{V_{\alpha}}$
Densità di bulk	$\rho_{\alpha,s} = \frac{m_{\alpha}}{V_s}$
Densità del solido	$\rho_s = \sum_{\alpha} \rho_{\alpha,s}$

Tabella 4.1 Tipologie di densità

Nel caso di un solido costituito da un unico materiale tutte le densità sono coincidenti nel momento iniziale, poi la densità di bulk evolve durante il processo di pirolisi. Infatti, la reazione di pirolisi porta a un consumo della massa di materiale, su un volume fissato di solido, che provoca una graduale diminuzione della densità. Una volta raggiunto il valore nullo, è possibile segnalare che un oggetto è consumato completamente attraverso una funzione che lo porta alla scomparsa.

Il processo di combustione dei gas infiammabili generati viene modellato tramite la reazione di combustione, come descritto nella seguente sezione.

## 4.2 REAZIONE DI COMBUSTIONE

All'interno del software è possibile definire la reazione di combustione attraverso due approcci: il modello di combustione *mixing - controlled* in cui la velocità di reazione è infinita e limitata solo dalle concentrazioni delle specie e il modello *finite-rate reactions* che utilizza reazioni la cui velocità è finita e descritta tramite il modello di Arrhenius. All'interno delle simulazioni come default è presente il modello *mixing-controlled* ed è quello utilizzato all'interno della tesi. Infatti, il modello *finite-rate reactions* non è consigliato da utilizzare in

combinazione al modello di calcolo LES utilizzato, perché le approssimazioni di temperatura all'interno delle celle possono portare i parametri della reazione ad ottenere risultati devianti. Inoltre, la combustione può essere descritta secondo due tipologie di reazione: *Simple Chemistry* e *Complex Stoichiometry*. Nel primo approccio è possibile considerare solo una singola specie di combustibile che ha come costituenti carbonio, idrogeno, ossigeno e azoto e la reazione viene semplificata considerando l'ossigeno come unico agente ossidante; quindi, gli unici prodotti di combustione che si formano sono acqua, biossido, monossido di carbonio e fuliggine. Mentre nel caso in cui il combustibile contiene altri elementi rispetto a quelli sopra citati o l'obiettivo è modellare le reazioni di combustione di più gas è necessario specificare la stechiometria della reazione con più dettaglio attraverso la tipologia *Complex Stoichiometry*.

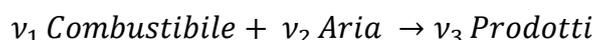
#### 4.2.1 SIMPLE CHEMISTRY

Per le reazioni di combustione semplificate è necessario fornire diversi tipi di informazioni: la formula chimica del gas combustibile, le frazioni in massa di combustibile convertite in monossido di carbonio, in fuliggine, la frazione volumetrica di idrogeno nella fuliggine e, nel caso sia presente azoto nel combustibile, la frazione convertita in acido cianidrico. Attraverso queste informazioni FDS calcola automaticamente i coefficienti stechiometrici della reazione. Inoltre, nel caso in cui il gas combustibile non sia presente all'interno del database di FDS è necessario specificare anche l'entalpia di combustione.

La durata della fiamma viene determinata in base alle condizioni imposte. Affinché la combustione continui è necessario che ci sia una sufficiente quantità di ossigeno e combustibile per aumentare la temperatura della cella dal suo valore corrente alla temperatura critica di fiamma. Per modellare l'estinzione è possibile impostare alcuni parametri come il limite inferiore di concentrazione dell'ossigeno o la temperatura critica di fiamma. Inoltre, per evitare delle riaccensioni si può impostare la temperatura di auto-ignizione, al di sotto della quale la combustione non può svilupparsi spontaneamente.

#### 4.2.2 COMPLEX STOICHIOMETRY

In questo approccio i coefficienti stechiometrici della reazione devono essere dettagliati dall'utente e non sono calcolati da FDS tramite l'utilizzo delle frazioni di monossido di carbonio, fuliggine e idrogeno. In questo caso è possibile considerare gas combustibili che contengono anche elementi diversi da carbonio, idrogeno, ossigeno e azoto. La reazione non è semplificata alla combustione con ossigeno, ma si tiene conto anche degli altri elementi presenti nell'aria; quindi, anche i prodotti di combustione sono una miscela da definire. Per implementare questo tipo di reazione è necessario definire la reazione attraverso la seguente forma:



in cui  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  sono i coefficienti stechiometrici del gas combustibile, dell'aria e dei prodotti.

Inoltre, è necessario specificare la composizione della miscela di aria considerata e la composizione dei prodotti attraverso l'assegnazione delle frazioni volumetriche di ciascun componente. FDS si assicura che con la stechiometria inserita, il bilancio di massa tra reagenti e prodotti e il numero di atomi all'interno della reazione sia conservato; se le due condizioni non risultano esse fornisce rispettivamente un'indicazione di errore.

#### 4.3 MODELLO DI TRASFERIMENTO DI CALORE

All'interno del software il trasferimento di calore può essere simulato considerando il modello di default in 1D che assume il trasferimento soltanto nella direzione normale alla superficie del solido oppure attraverso il modello 3D (Beta) che permette di considerare anche il calore trasferito lateralmente.

Per il modello in 1D l'espressione per il trasferimento di calore è rappresentata dall'Eq. (4.15) in cui la direzione  $x$  è considerata normale alla superficie del solido e  $x = 0$  coincide con l'interfaccia.

$$\rho_s c_{PS} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \dot{q}_s''' \quad \text{Eq. (4.15)}$$

dove:

- $\rho_S, c_{PS}, k_S$  sono le proprietà medie del solido;
- $\dot{q}_S''' = \dot{q}_{S,C}''' + \dot{q}_{S,R}'''$  consiste nel termine derivante dal calore associato alla reazione chimica ( $\dot{q}_{S,C}'''$ ) e il termine radiativo di assorbimento ed emissione ( $\dot{q}_{S,R}'''$ );
- $k_S \frac{\partial T_S}{\partial x} = \dot{q}_C'' + \dot{q}_r''$  dove sono  $\dot{q}_C''$  e  $\dot{q}_r''$  sono rispettivamente il calore del flusso convettivo e radiativo.

Considerando la superficie di interfaccia tra solido e gas, i flussi di calore sono dovuti a convezione ed irraggiamento all'interno del gas, mentre per la fase solida sono dovuti al meccanismo di conduzione. La temperatura sulla superficie del solido è correlata a tutti questi flussi per ogni istante di tempo.

Per il modello in 3D l'equazione di trasferimento di calore assume la seguente forma (Eq. (4.16)):

$$\rho_S c_{PS} \frac{\partial T_S}{\partial t} = \nabla \dot{q}'' + \dot{q}_S''' \quad \text{Eq. (4.16)}$$

In questo caso in flusso termico non viene considerato soltanto nella direzione  $x$  perpendicolare alla superficie, ma è presente il gradiente di flusso termico che tiene conto anche dei flussi nelle altre direzioni, come rappresentato nella Figura 4.1.

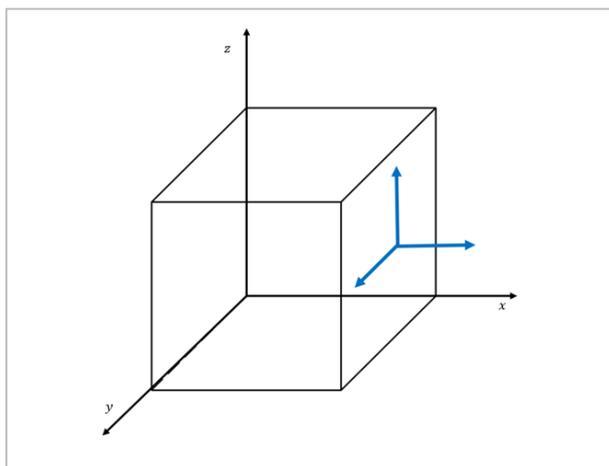


Figura 4.1 Rappresentazione del modello di trasferimento di calore in 3D

Nel modello in 1D il flusso di calore tra il solido e i gas circostanti viene scambiato all'interno del materiale fino a una determinata profondità che dipende dal valore dello spessore del materiale solido. Al contrario nel modello di trasferimento del calore in 3D lo spessore  $\delta$  di penetrazione del calore dipende soltanto dalle proprietà del materiale  $\rho_S, c_{PS}, k_S$  e una scala temporale arbitraria  $\tau$  impostata sull'unità, come nella seguente espressione (Eq. (4.17)):

$$\delta = \sqrt{\frac{\tau k_S}{\rho_S c_{PS}}} \quad \text{Eq. (4.17)}$$

Pertanto, per il modello in 3D lo spessore del materiale associato alla superficie non viene considerato ai fini del calcolo del trasferimento di calore.

Al modello di trasferimento di calore in 3D è accoppiato il processo di pirolisi in 3D (BETA). Il modello utilizza una forma molto semplice del trasferimento di massa: qualsiasi massa che viene pirolizzata viene trasportata immediatamente in una cella superficiale per essere iniettata nella fase gassosa. Essa viene trasportata nella cella della parete più vicina, anche se è possibile specificare la direzione nella quale inviare la massa. Per questo motivo nel caso di un oggetto costituito da più strati è necessario che ciascuno strato sia associato ad un oggetto diverso, perché lo spessore non viene considerato. Nel modello 3D sia il processo di scambio termico che di pirolisi sono quindi indipendenti dallo spessore associato alla superficie del materiale.

## 5. MODELLAZIONE

In questo capitolo viene descritto come è stata eseguita la modellazione del *fire-test* e le valutazioni necessarie alla determinazione delle caratteristiche del modello al fine di ottenere una simulazione dell'incendio, la cui curva HRR possa essere utilizzata per il confronto con la curva determinata dall'applicazione della normativa. In primo luogo, sono stati definiti i parametri di input sulla base della geometria e dei materiali contenuti all'interno della pila utilizzata durante la prova d'incendio.

Vista la varietà dei materiali presenti, la modellazione è stata semplificata scegliendo di utilizzare un unico materiale con le caratteristiche del polipropilene, principale costituente della pila. Una volta ricercati in letteratura i dati di input necessari alla modellazione, quali le proprietà del materiale e i dati necessari alla descrizione della reazione di pirolisi e di combustione, è stata riprodotta la geometria della pila.

Successivamente sono state svolte diverse analisi per valutare:

- la scelta del modello di trasferimento di calore da utilizzare;
- la scelta della griglia di calcolo e verificare l'indipendenza dei risultati da essa;
- le caratteristiche dell'innesco al fine di riprodurlo il più simile possibile a quello della prova sperimentale;
- la differenza tra i modelli di combustione per riportare nel modello quello più realistico.

Queste valutazioni hanno permesso di individuare tutte le caratteristiche del modello per simulare la prova d'incendio, i cui risultati sono analizzati nel capitolo successivo.

## 5.1 DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI INPUT

Per la definizione dei parametri di input per la modellazione è stata esaminata la geometria dei bancali utilizzati nella prova d'incendio e i materiali da cui essi sono costituiti, al fine di comprendere quali impostare all'interno del software e le loro caratteristiche.

La pila è composta da 8 bancali appoggiati su pallet di legno, come mostrato in Figura 5.1. I bancali a sinistra sono caratterizzati da scatole più piccole contenenti ciascuna 4 sedie, mentre i bancali a destra contengono scatole di dimensioni maggiori all'interno delle quali c'è un set con 1 tavolo e 2 sedie da giardino. Nota la composizione specifica della merce, fornita dall'azienda proprietaria, è stato possibile valutare le dimensioni della pila e la massa dei vari materiali contenuti all'interno dei bancali.



*Figura 5.1 Pila di bancali utilizzata durante la prova d'incendio*

#### DIMENSIONI DELLA PILA UTILIZZATA NELLA PROVA D'INCENDIO

Gli euro pallets su cui poggia la merce sono di dimensioni 1.2 m x 1.0 m. Per questo motivo essendo 4 i pallet appoggiati in pianta l'area dell'impronta della pila risulta di 4.8 m<sup>2</sup>. L'altezza della pila misurata è di 4.5 m. In Tabella 5.1 sono riassunte le dimensioni della pila.

Dimensioni bancali	Valore
Lunghezza	2.4 m
Larghezza	2.0 m
Altezza	4.5 m
Impronta totale sulla superficie	4.8 m <sup>2</sup>
Volume totale	21.6 m <sup>3</sup>

Tabella 5.1 Dimensioni della pila

#### MATERIALI

La merce è materiale plastico, in particolare polipropilene, mentre l'imballaggio è costituito da cartone, legno e plastica. Per la tipologia di merce dei bancali a sinistra, sono noti i chilogrammi di materiale per 1 paletta da 20 confezioni, quindi è stato possibile ricavare la percentuale di ciascun materiale all'interno delle 20 confezioni. Attraverso l'ipotesi ragionevole che la percentuale di imballaggio sia sempre la stessa, si ottiene la massa di ciascun materiale per il numero delle scatole contenute all'interno dei bancali, pari a 54 [Tabella 5.2].

Materiale	Massa in 20 scatole (kg)	Percentuale di materiale %	Massa in 54 scatole (kg)
Cartone	18.66	7.3	50.38
Legno	13	5.1	35.10
Plastica	0.76	0.3	2.05
Polipropilene	222.4	87.3	600.48
Totale	254.82	100	688.01

Tabella 5.2 Massa dei materiali presenti nei bancali di sinistra

Per i bancali a destra contenenti i set da giardino invece è noto soltanto il peso di 1 scatola pari a 13.6 kg. Considerando che la percentuale di imballaggio all'interno della scatola sia simile a quella della merce sopra descritta, sono stati valutati i chili di materiale all'interno di ciascuna scatola e poi in 20 scatole, il numero di confezioni presenti all'interno della pila [Tabella 5.3].

Materiale	Percentuale di materiale %	Massa in una scatola (kg)	Massa in 20 scatole (kg)
Cartone	7.3	1	19.92
Legno	5.1	0.69	13.88
Plastica	0.3	0.04	0.81
Polipropilene	87.3	11.87	237.39
Totale	100	13.6	272

Tabella 5.3 Massa dei materiali presenti nei bancali di destra

Quindi il numero totale di chili di ogni materiale contenuto all'interno dell'intera pila coinvolta nella prova d'incendio è pari alla somma dei materiali nelle scatole delle due diverse tipologie di merce [Tabella 5.4].

Materiale	Massa sedie in 54 scatole (kg)	Massa set in 20 scatole (kg)	Massa totale (kg)
Cartone	50.38	19.92	70.30
Legno	35.10	13.88	48.98
Plastica	2.05	0.81	2.86
Polipropilene	600.48	237.39	837.87
Totale	688.01	272	960.01

Tabella 5.4 Riassunto della massa dei materiali presenti nella pila

Visto l'elevato numero di materiali e l'impossibilità di stabilire con precisione la loro posizione all'interno delle scatole in modo da poterli schematizzare in un modello, la pila è stata considerata costituita da un unico materiale a cui è stata assegnata una densità equivalente.

Nota il volume totale e la massa totale, la densità equivalente ( $\rho$ ) media della pila è stata calcolata secondo l'equazione seguente (Eq. (5.1)):

$$\rho = \frac{\text{Massa totale}}{\text{Volume totale}} \quad \text{Eq. (5.1)}$$

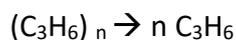
Essendo il polipropilene il principale costituente della merce incendiata durante il *fire-test*, è stato scelto di approssimare le caratteristiche dell'unico materiale considerato a quelle di questo composto polimerico, con l'unica eccezione della densità. La densità equivalente della pila è pari a 44.44 kg/m<sup>3</sup> (calcolata secondo l'Eq. (5.1)), molto inferiore a quella del polipropilene (960 kg/m<sup>3</sup>). Questa prima ipotesi ha inoltre permesso una semplificazione nella riproduzione dei fenomeni che avvengono durante l'incendio perché ha consentito di considerare solamente le reazioni di pirolisi e combustione del polipropilene, trascurando le reazioni degli altri materiali. Il polipropilene allo stato solido, sottoposto ad elevate temperature pirolizza dando origine a gas infiammabili di propilene che bruciano.

### 5.1.1 IMPOSTAZIONE DELLE PROPRIETÀ

Per realizzare la simulazione sono state impostate le proprietà termiche del polipropilene (calore specifico e conduttività) reperite in letteratura (Society of Fire Protection Engineering, 2016). Come valore di densità, visto che lo scopo è modellare i bancali costituiti da un unico materiale rappresentativo, è stato scelto di utilizzare la densità media della pila, pari a 44.44 kg/m<sup>3</sup>.

### 5.1.2 PIROLISI

Come reazione di pirolisi, è stato considerato un unico meccanismo: la reazione di depolimerizzazione che porta alla formazione del suo monomero in fase gas, il propilene:



Attraverso i vapori di propilene si genera la reazione di combustione.

Per modellare la reazione di pirolisi è stato reperito il termogramma sulla degradazione termica del polipropilene in letteratura (Aboulkas et al., 2010). All'interno dell'articolo il termogramma è presente a diverse rampe di riscaldamento e sono calcolati i parametri cinetici. Per la realizzazione della simulazione è stata considerata la rampa di 10 K/min.

Dal termogramma [Figura 5.2] si nota che la reazione di pirolisi avviene principalmente in un range di 120 K da circa 645 K a 765 K e la temperatura a cui il materiale pirolizza più velocemente è di 725 K, corrispondente a 452 °C come confermato dal grafico sottostante [Figura 5.3] che esprime il tasso di perdita di massa in funzione della temperatura.

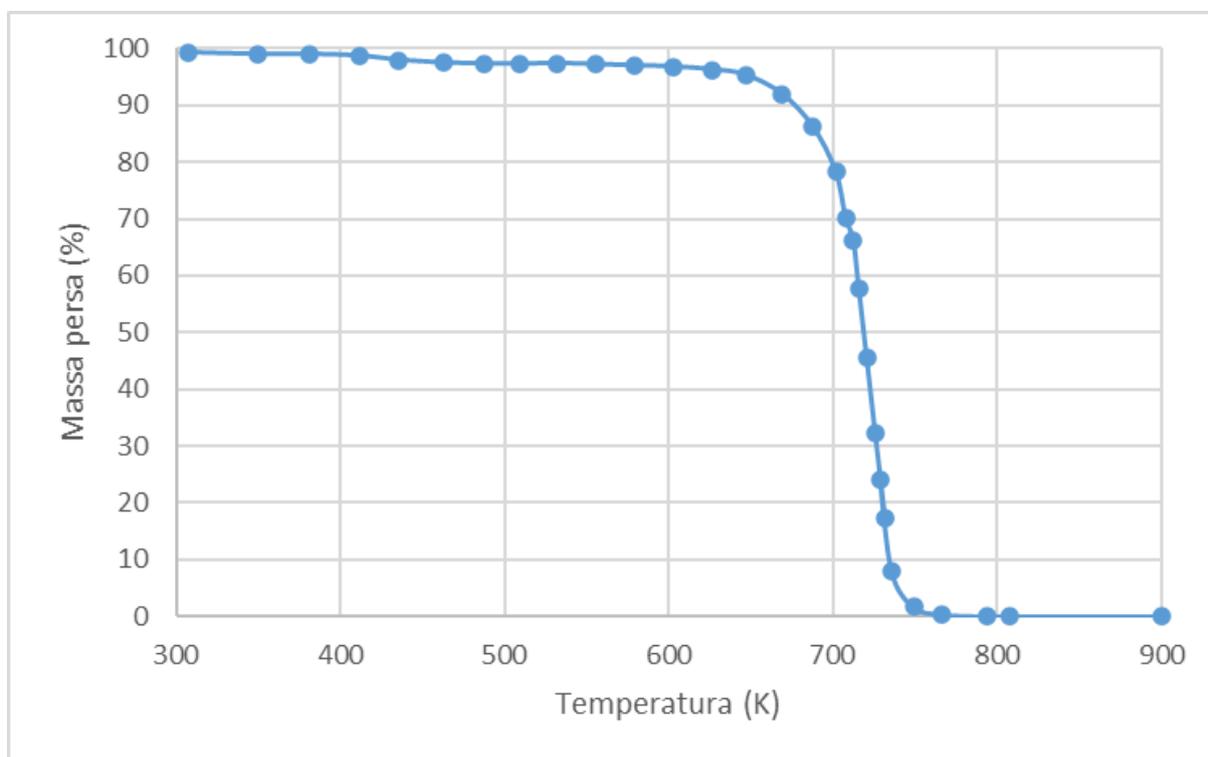


Figura 5.2 Curva termo-gravimetrica del polipropilene alla rampa di 10 K/min

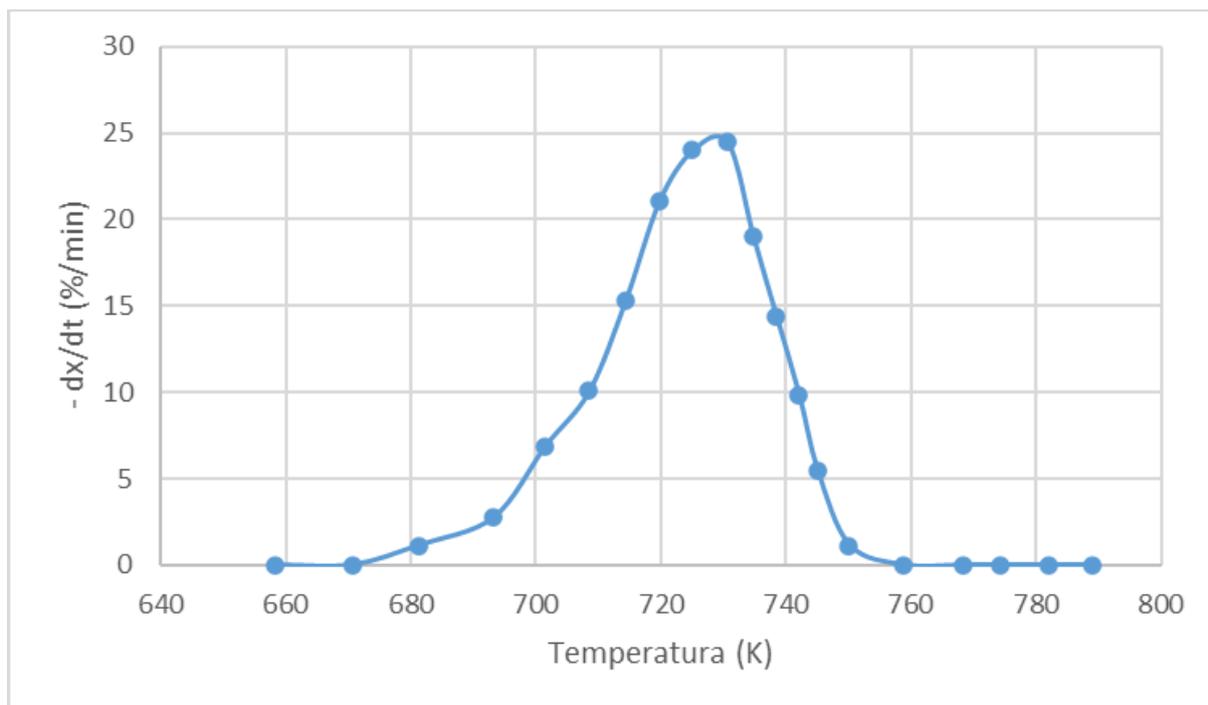


Figura 5.3 Curva della velocità di variazione della massa in funzione del tempo

### 5.1.3 ENTALPIA DI PIROLISI

Per l'entalpia di reazione di pirolisi, non è stato trovato nessun valore in letteratura; pertanto, essa è stata ricavata attraverso la definizione generale di entalpia di reazione (Eq. (5.1)):

$$\Delta H_r^0 = \sum_{\text{prodotti}} \nu \Delta H_f^0 - \sum_{\text{reagenti}} \nu \Delta H_f^0 \quad \text{Eq. (5.1)}$$

in cui  $\Delta H_f^0$  sono le entalpie di formazione dei prodotti e dei reagenti allo stato standard. L'entalpia di formazione è la variazione di entalpia che si genera durante la formazione di una mole di composto al suo stato standard a partire dai suoi elementi costituenti ai loro stati standard. Come stato standard si intendono i composti al loro stato di aggregazione più stabile alle condizioni di 1 bar e 298.15 K.

Per valutare le entalpie di formazione è stato utilizzato il metodo di Domalski-Hearing, trattato in letteratura (Green et al., 2019). Esso è un metodo ai contributi di gruppo, che attraverso valori tabulati di entalpia di formazione di diversi gruppi chimici funzionali caratteristici delle molecole, permette di ricavare le entalpie di formazione dei composti sulla base della loro

struttura chimica. Quindi l'entalpia di formazione è data dalla somma del contributo di ciascun gruppo funzionale presente all'interno della molecola (Eq. (5.2)):

$$\Delta H_f^0 = \sum_{i=1}^n n_i (\Delta H_f^0)_i \quad \text{Eq. (5.2)}$$

Dove  $i$  rappresenta la tipologia di gruppo funzionale ed  $n_i$  è il numero di volte in cui gruppo funzionale compare all'interno della molecola.

In Tabella 5.5 i valori relativi al propilene e al polipropilene. Per quest'ultimo è stato considerato il monomero di formazione ( $C_3H_6$ ) ripetuto  $n$  volte all'interno della catena polimerica, trascurando la piccola variazione delle due molecole alle estremità dovuto alla diversità dei legami.

Propilene	Entalpia (kJ/mol)	Monomero	Entalpia (kJ/mol)
C - (3H)(C)	-42.26	C - (2H)(2C)	-29.41
Cd - (H)(C)	36.32	C - (H)(3C)	-5.98
Cd - (2H)	26.32	C - (3H)(C)	-46.74
Somma	20.38	Somma	-82.13

Tabella 5.5 Entalpie di formazione del propilene e del monomero di polipropilene

Considerando la reazione di pirolisi come reazione inversa di polimerizzazione, si ottiene un numero di  $n$  molecole di propilene per  $n$  monomeri costituenti. Utilizzando l'Eq. (5.1) l'entalpia di reazione:

$$n \left( 20.38 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right) - n \left( -82.13 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right) = + 102.51 \text{ kJ/mol} .$$

Quindi, noto il peso molecolare:

$$\Delta H_r^0 = + 2440.71 \text{ kJ/kg}.$$

L'entalpia di reazione calcolata è un parametro a cui è associato un'incertezza, ma essa risulta essere ininfluenza all'interno del modello. Il motivo è dovuto al fatto che l'entalpia di reazione corrisponde al calore necessario per far avvenire la reazione di pirolisi, che viene fornito, eccetto nei momenti iniziali, mediante la reazione di combustione. L'entalpia di combustione associata al propilene risulta essere di 46400 kJ/kg, circa 19 volte l'entalpia di pirolisi; perciò soltanto una minima parte del calore di combustione viene utilizzato per la pirolisi mentre la restante parte viene rilasciata nell'ambiente, contribuendo alla curva di rilascio termico. Il calore di pirolisi quindi risultando basso rispetto al calore di combustione, anche se soggetto a un errore del 20-30%, non risulta influire sulla curva di rilascio termico.

Per valutare la modellazione della reazione di pirolisi, è stata costruita una simulazione di geometria semplice in cui gli oggetti sono stati esposti ad elevate temperature per verificare la decomposizione termica del materiale, indicata all'interno del software dalla sparizione degli oggetti.

### 5.1.4 COMBUSTIONE

Modellata la reazione di pirolisi è stata inserita la reazione che regola il processo di combustione. In questo caso, poiché si considerano i bancali costituiti da un unico materiale, si ha un unico gas combustibile e la reazione può essere descritta sia tramite il modello *Simple Chemistry*, sia in termini più dettagliati tramite il modello *Complex Stoichiometry*. Nella prima simulazione implementata è stato utilizzato il modello *Simple Chemistry*, poi successivamente è stata determinata anche la curva HRR impiegando il modello *Complex Stoichiometry* (sezione 5.6) per valutare se la tipologia di reazione utilizzata possa avere qualche influenza sui risultati ottenuti.

#### 5.1.4.1 SIMPLE CHEMISTRY

Attraverso il primo approccio semplificato, si considera che la reazione di combustione avviene unicamente tra il gas e l'ossigeno, trascurando la composizione dell'aria. FDS calcola automaticamente i coefficienti stechiometrici della reazione, avendo come dati di input le frazioni in massa di combustibile convertito in monossido di carbonio, in fuliggine e la frazione volumetrica di idrogeno nella fuliggine. Questi termini sono stati reperiti all'interno dell'*SFPE*

*Handbook* (Hurley, n.d.). Inoltre, è stata impostata l'entalpia della reazione di combustione e per evitare fenomeni di riaccensione delle fiamme la temperatura di auto-ignizione.

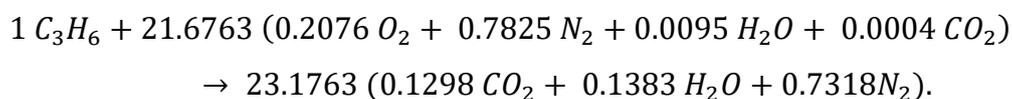
#### 5.1.4.2 COMPLEX STOICHIOMETRY

Per implementare il modello *Complex Stoichiometry* invece è necessario conoscere preventivamente i coefficienti stechiometrici della reazione. In questo caso si considera la composizione dell'aria ed è stata scelta la composizione media che si trova in natura, riportata in Tabella 5.6, trascurando tutti gli altri componenti in percentuale inferiore:

Specie	Composizione percentuale
Azoto	78.25
Ossigeno	20.76
Vapor d'acqua	0.95
Diossido di carbonio	0.04

Tabella 5.6 Composizione dell'aria

Considerando la reazione di una singola mole di gas combustibile e nota la composizione dell'aria, sono valutati i coefficienti stechiometrici da assegnare alla reazione. Essi sono stati determinati attraverso un procedimento iterativo basato sull'uguaglianza delle specie atomiche tra i reagenti e i prodotti che ha portato alla determinazione del coefficiente stechiometrico per l'aria e conseguentemente dei prodotti di combustione. Di seguito i coefficienti ottenuti per la reazione:



Anche in questo caso, è stato verificato il funzionamento della reazione di combustione su una simulazione di geometria semplice, poi successivamente queste soluzioni sono state implementate nella simulazione con la geometria modellata dei bancali.

## 5.2 GEOMETRIA DI MODELLAZIONE

L'obiettivo della modellazione è di riprodurre la pila di bancali nel modo più fedele possibile al *fire-test*; pertanto, la forma della pila considerata tiene conto anche dell'intercapedine di aria generata dal posizionamento dei pallet. Tuttavia, per effettuare le valutazioni successive, è stato utilizzato solo un quarto della pila dei bancali, come mostrato in Figura 5.4, in modo da ridurre i costi computazionali per valutare i vari aspetti della modellazione descritti nei capitoli successivi in un tempo ridotto. Una volta effettuate tutte le valutazioni e avendo chiare le caratteristiche del modello con cui confrontare i risultati ottenuti dall'applicazione della normativa, l'intenzione è di effettuare la simulazione con la geometria completa della pila.

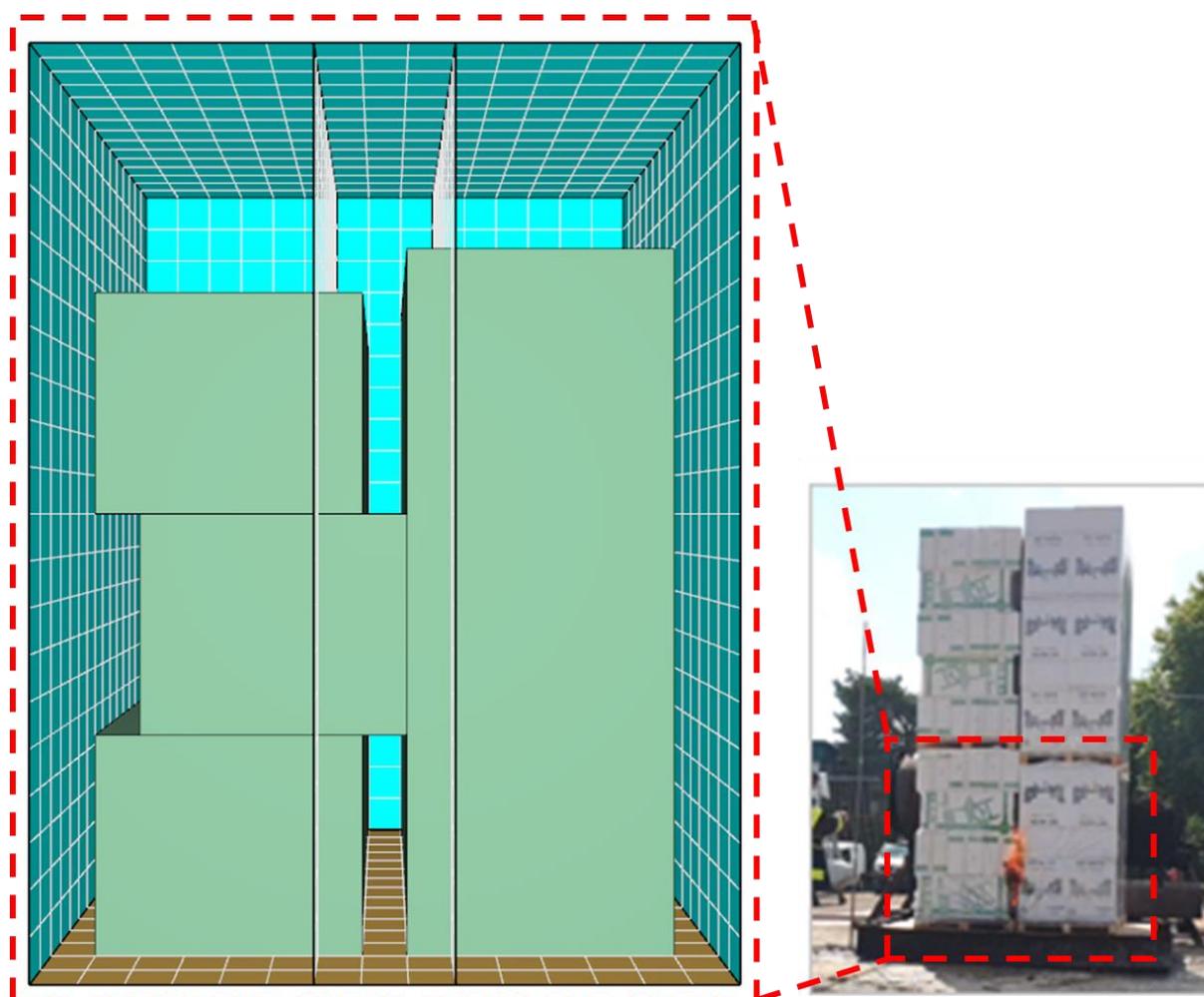


Figura 5.4 Configurazione geometrica considerata per tutte le valutazioni successive

### 5.3 SCELTA DEL MODELLO DI TRASFERIMENTO DI CALORE

Come presentato nella sezione 4.3, all'interno del software il trasferimento di calore può essere simulato attraverso due modelli: il modello di default in 1D e il modello in 3D. In questa sezione viene effettuata la scelta dal modello da utilizzare. Come si vedrà in seguito, questa scelta ha un forte impatto sui risultati.

Nel modello in 1D il trasferimento di calore viene calcolato considerando lo spessore di materiale presente all'interno degli oggetti ed è stato quindi necessario determinarlo. Per il software il materiale contenuto all'interno degli oggetti è considerato unicamente all'interno dello spessore assegnato; quindi, per stimare tale valore è necessario conoscere la massa di materiale in essi contenuta. Considerando che nella simulazione sono rappresentati circa un quarto dei bancali, è stato ipotizzato che il materiale presente all'interno della pila risulti essere circa un quarto. È stato considerato uno spessore di primo tentativo e calcolato il rispettivo volume dedicato allo strato di materiale. Il volume moltiplicato per la densità del materiale permette di calcolare la massa all'interno dello spessore, coincidente con la massa dell'oggetto. Confrontando la massa ottenuta con quella realmente presente all'interno di un quarto della pila, è stato iterato lo spessore fino ad ottenere l'uguaglianza delle masse. Lo spessore risulta di 0.32 m. In APPENDICE è mostrato il procedimento seguito per la simulazione

Se all'interno del software viene invece implementato il modello di trasferimento di calore in 3D, esso non valuta lo spessore assegnato alla superficie e ogni oggetto viene considerato completamente riempito di materiale.

In Figura 5.5 è mostrato il confronto tra le curve HRR ottenute da due simulazioni aventi come unica differenza la scelta del modello di trasferimento di calore nel solido (3D o 1D). Le simulazioni sono state effettuate con la griglia di calcolo definita secondo quanto approfondito all'interno della sezione 5.4 e con le caratteristiche dell'innesco secondo le osservazioni della sezione 5.5. In APPENDICE gli script delle simulazioni, SIMULAZIONE A e SIMULAZIONE B, si riferiscono rispettivamente al caso in 3D e in 1D.

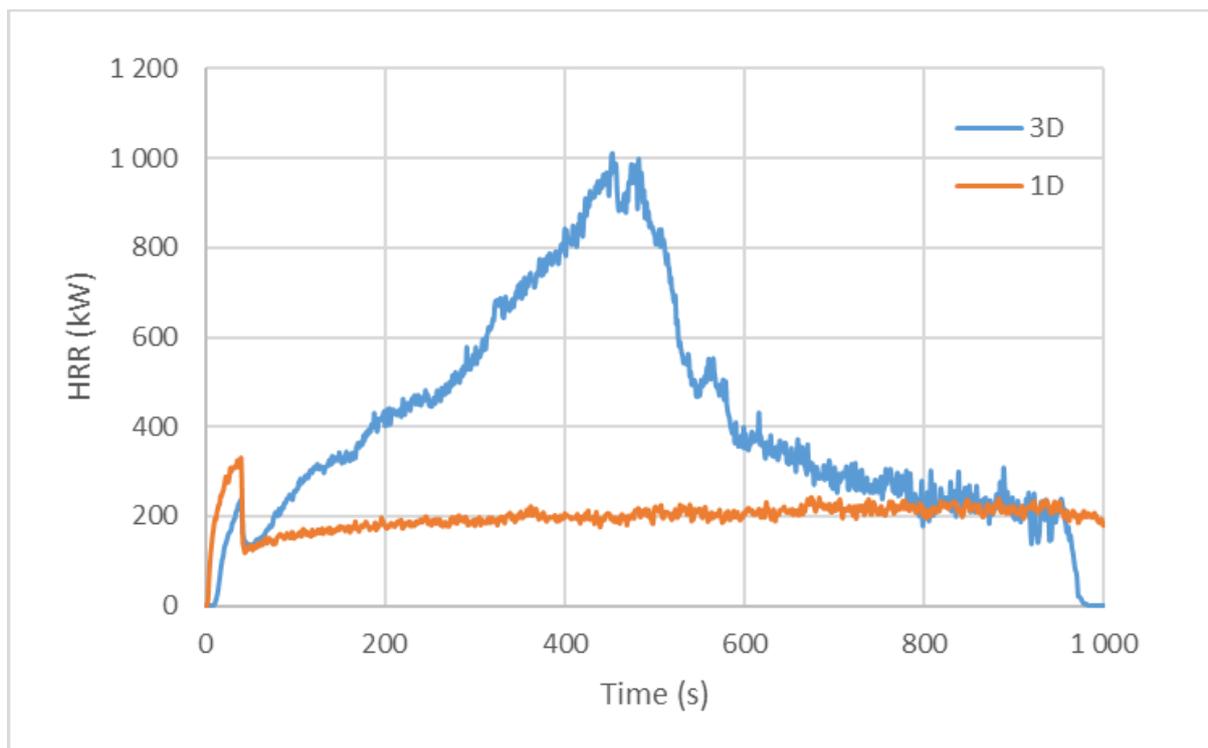


Figura 5.5 Confronto tra le curve HRR ottenute dalle simulazioni con il modello in 3D e in 1D

Dalla Figura 5.5 si nota che le curve HRR sono estremamente diverse; perciò, il modello di trasferimento di calore scelto risulta essere determinante nel calcolo della curva di potenza termica rilasciata. Questo è dovuto al fatto che il trasferimento di calore in 1D, solo in direzione perpendicolare alla superficie, porta le celle della *mesh* ad incendiarsi più lentamente e meno materiale riesce a bruciare contemporaneamente, portando ad una curva HRR quasi costante.

All'interno della tesi per le valutazioni successive è stato scelto di utilizzare il modello di trasferimento del calore in 3D. Infatti, esso rappresenta una modalità di trasferimento del calore più realistica e permette di realizzare simulazioni in cui i risultati sono indipendenti dallo spessore determinato.

## 5.4 VALUTAZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO

Per effettuare una simulazione ad ogni modello è necessario assegnare un dominio di calcolo che può essere costituito da un unico volume o più volumi, divisi in un numero di celle rettangolari. Le griglie di calcolo sono chiamate *mesh* e possono avere celle di dimensioni differenti, dalla cui grandezza dipende la raffinatezza dei calcoli. In questa sezione viene analizzata la dimensione delle celle più adatta e viene verificato che i risultati ottenuti siano indipendenti dalle griglie di calcolo. Perciò sono state valutate le diverse griglie al fine di ottenere l'indipendenza dei risultati.

Più una *mesh* è fine, più i calcoli sono accurati, ma allo stesso tempo aumenta il costo computazionale e di conseguenza il tempo di calcolo richiesto. Pertanto, per ottimizzare i calcoli ottenuti e le prestazioni, è stato scelto di suddividere il dominio utilizzando diverse *mesh*, in modo tale da usare la *mesh* più fine solo in corrispondenza delle zone che necessitano di essere descritte con maggior dettaglio e *mesh* con celle più grandi nelle regioni del dominio in cui è sufficiente una descrizione meno accurata.

Per valutare le dimensioni delle celle della *mesh* in letteratura (McGrattan, Hostikka, Floyd, McDermott, & Vanella Marcos, 2022) si suggerisce l'impiego di *mesh* comprese tra il 10% e il 20% del diametro caratteristico dell'incendio dato dalla seguente formula (Eq. (5.4)):

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} = \left( \frac{\dot{Q}}{1100} \right)^{\frac{2}{5}} \quad \text{Eq. (5.4)}$$

dove:

- $D^*$  è il diametro caratteristico d'incendio [m];
- $\dot{Q}$  è la massima potenza termica rilasciata [kW];
- $\rho_{\infty}, c_p, T_{\infty}$  sono la densità [ $kg/m^3$ ], il calore specifico [ $\frac{kJ}{kg K}$ ] e la temperatura [K] dell'aria alle condizioni ambientali e possono essere considerate costanti;
- $g$  è l'accelerazione di gravità [ $m/s^2$ ].

Come massima potenza termica rilasciata è stata considerata quella ottenuta dalle prove sperimentali pari a 5468 kW e il diametro caratteristico  $D^*$  ottenuto è pari a 1.89 m. Pertanto, il range per la dimensione delle celle suggerito è tra 0.18 m e 0.37 m. Da ciò si deduce che non è consigliabile valutare una *mesh* con celle di dimensioni maggiori di 0.30 m. Inoltre, visto che la geometria dei bancali include un'intercapedine tra le due pile verticali di circa 0.10 m e l'innesco viene posto alla base di questo, per non realizzare uno spazio di dimensioni più elevate, per le celle della griglia è stata scelta come massima grandezza la dimensione di 0.10 m. In Figura 5.4 la geometria considerata per la valutazione delle *mesh*.

Nelle simulazioni con le varie griglie differenti sono emerse discrepanze nel calcolo della curva HRR, come mostrato in Figura 5.6.

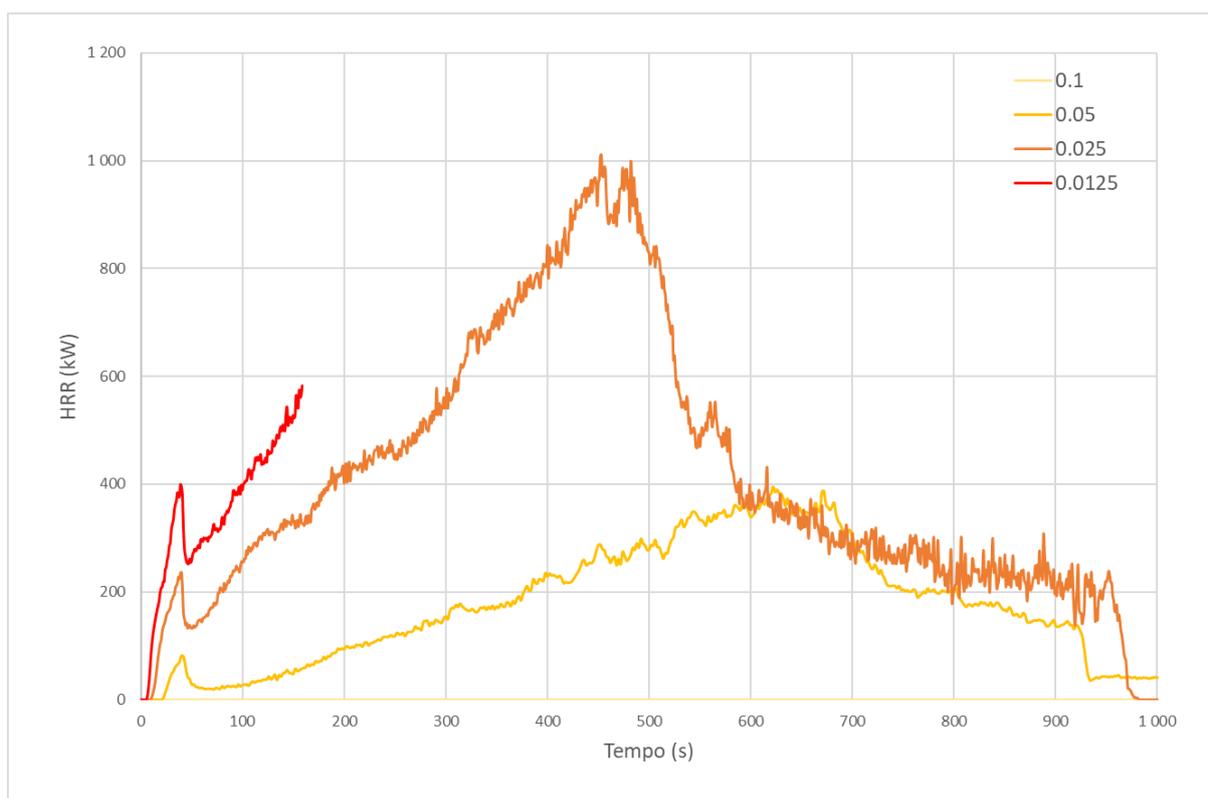


Figura 5.6 Confronto tra le curve HRR calcolate per la stessa simulazione alle diverse mesh di celle di dimensioni di 0.1 m, 0.05 m, 0.025 m e 0.0125 m

Dalla Figura 5.6 si nota che il valore di HRR massimo è molto differente per le varie *mesh*; in particolare, all'aumentare della raffinatezza della *mesh*, il valore del picco tende a crescere e ad essere raggiunto più velocemente. Infatti, al diminuire delle dimensioni delle celle i picchi tendono a spostarsi verso sinistra. Griglie di calcolo più lasche presentano curve di potenza termica rilasciata con valori molto bassi, tanto da essere nulli per *mesh* con dimensioni delle celle al di sopra di 0.10 m. Raffinando la griglia di calcolo, (la simulazione con la *mesh* con celle da 0.0125 m è stata interrotta per ragioni di disponibilità dei mezzi di simulazione) le curve di rilascio termico raggiungono valori sempre più elevati. Inoltre, la loro distanza diminuisce, suggerendo che non si è lontani dal raggiungere una dimensione delle celle per cui i risultati siano indipendenti dalla griglia di calcolo. Sfortunatamente, la mancanza di risorse computazionali adeguate, non ha permesso di svolgere simulazioni con *mesh* più fini.

Vista la discrepanza tra le curve ottenute è stata effettuata una valutazione sui motivi di tale risultato. In particolare, la causa è stata individuata nella geometria utilizzata.

Infatti, questo tipo di geometria in cui si ha uno stretto spazio tra due pareti di altezza elevata può richiedere *mesh* di calcolo con celle molto piccole per visualizzare l'indipendenza dei risultati, dovute al fatto che se la fessura ha dimensioni confrontabili con le dimensioni delle celle della *mesh* viene profondamente modificata in seguito al consumo e alla sparizione delle celle. Pertanto, considerando l'intercapedine di 0.10 m e visualizzando in Figura 5.7 celle con dimensioni di 0.10 m, 0.05 m, 0.025 m, si nota nel caso in cui le due celle di materiale adiacente alla fessura siano consumate, che l'intercapedine si allarga secondo la Tabella 5.7.

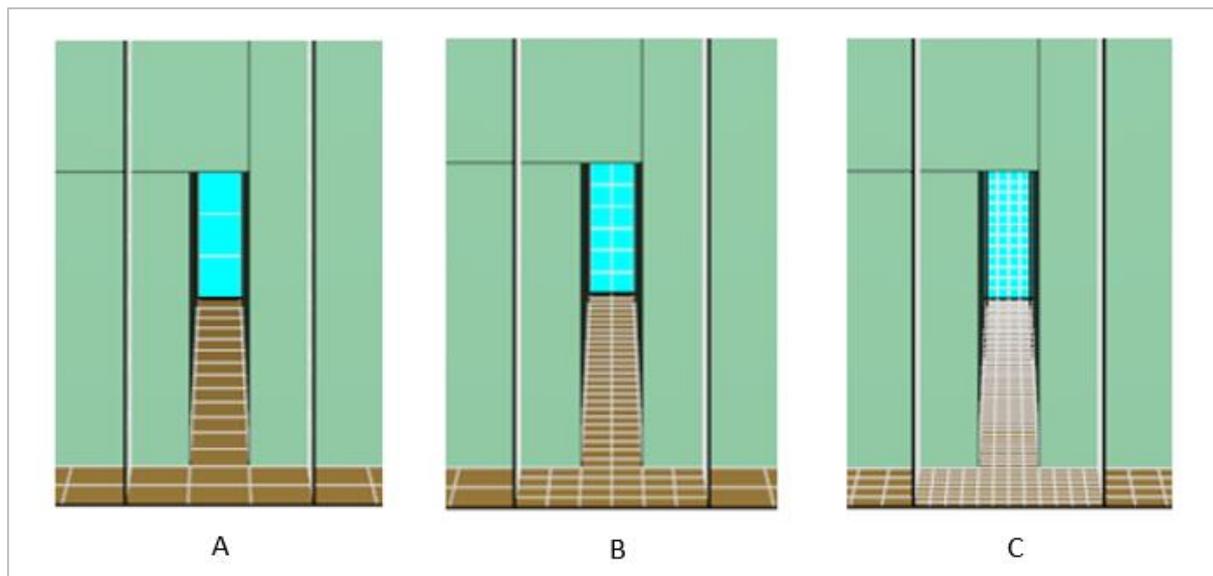


Figura 5.7 Mesh all'intercapedine di 0.10 m (A), 0.05 m (B) e 0.025 m (C)

Dimensione celle	0.10 m	0.05 m	0.025 m
Larghezza dell'intercapedine	0.30 m	0.20 m	0.15 m
Percentuale in aumento	200 %	100 %	50 %

Tabella 5.7 Larghezza del canale in funzione delle dimensioni delle celle

In base alle dimensioni delle celle della *mesh* la variazione della larghezza del canale risulta essere molto diversa e pertanto lo è anche la fluidodinamica al suo interno, quindi tra le *mesh* è lecito aspettarsi che i risultati calcolati siano differenti. Questa variazione può essere ridotta utilizzando *mesh* con celle di dimensioni sempre più piccole visto che portano ad ottenere una variazione di larghezza sempre meno significativa.

Inoltre, utilizzando griglie con dimensioni diverse essendo la figura scomposta in celle di diversa grandezza, anche la distribuzione della temperatura sulla parete risulta essere differente. In Figura 5.8 l'andamento della temperatura di parete al diminuire delle dimensioni delle celle.

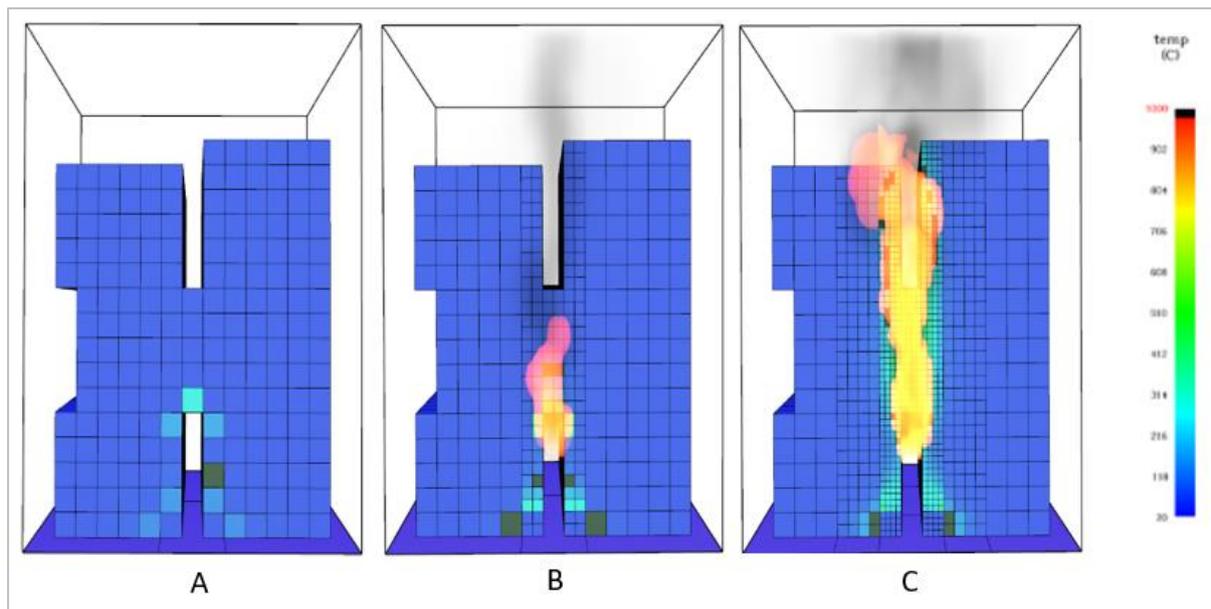


Figura 5.8 Andamento delle temperature di parete all'istante di 50 s dall'inizio della simulazione, per le mesh di grandezza 0.10 m (A), 0.05 m (B) e 0.025 m (C)

Per le celle più grandi i valori di temperatura sono mediati su uno spazio maggiore e le celle adiacenti all'innesco coinvolgendo una maggiore parte di figura risultano avere temperature più basse. Più invece le *mesh* sono fini, minore è la parte di figura occupata dalle celle immediatamente vicine all'innesco e la temperatura al loro interno risulta essere più elevata portando prima al fenomeno della combustione che svilupperà quindi l'incendio in maniera diversa. Infatti, al diminuire della dimensione delle celle, allo stesso istante, la fiamma risulta essere sempre più elevata.

Queste osservazioni sono state confermate anche in letteratura (Livkiss et al., 2019). L'articolo studia l'applicabilità del software FDS per predire i flussi di calore e la propagazione delle fiamme all'interno di una stretta cavità di 40 mm tra due muri paralleli. Gli autori confrontano l'altezza della fiamma fornita da FDS quando il 95% e il 99% del combustibile viene consumato, con l'altezza di fiamma derivante dai dati sperimentali. Per la cavità sono state studiate due *mesh* con celle di dimensioni di 2 e 4 mm nella zona di intercapedine più vicina al bruciatore e da questo studio è emerso che i risultati sono influenzati dalla griglia di risoluzione soprattutto vicino all'innesco, dove il materiale viene consumato per primo a causa del calore, mentre più lontano questa influenza diminuisce. Inoltre, la griglia più fine risulta fornire i risultati più vicini

a quelli ottenuti sperimentalmente; quindi, per modellare una geometria di questo tipo sono necessarie celle di dimensioni molto inferiori alla larghezza della cavità.

Per tali motivi, per ottimizzare la risoluzione del modello è stata posta una *mesh* più fine nella zona corrispondente all'intercapedine, mentre all'esterno dei bancali in cui i risultati non sono più dipendenti dalla geometria sono state utilizzate *mesh* con celle di dimensioni più elevate. Durante queste valutazioni sono però emersi dei limiti computazionali: non è stato possibile, per mancanza di potenza di calcolo, valutare *mesh* con celle di dimensioni inferiori a 0.0125 m. Infatti, dimezzando ogni volta il lato delle celle cubiche della *mesh*, ogni cella viene sostituita da un numero di celle pari a  $2^3$ , portando in breve ad un elevatissimo numero di celle. In particolare, per le *mesh* utilizzate, ogni cella della mesh iniziale di 0.10 m, è stata sostituita da un numero di celle riportato in Tabella 5.8.

Dimensione nuovo lato (m)	0.1	0.05	0.025	0.0125
Rapporto tra i lati	1	2	4	8
Numero di celle nel volume di cella iniziale	1	8	64	512

Tabella 5.8 Previsione del numero di celle che si formano per ciascuna cella al variare della mesh

Da ciò si deduce, considerando il numero di celle presenti, che ogni valutazione aumenta significativamente il costo computazionale e il tempo richiesto per i calcoli. Inoltre, utilizzando più *mesh* all'interno della simulazione non è possibile modificare solo la dimensione delle celle della *mesh* all'intercapedine ma, per evitare che ci sia una perdita di informazioni tra una *mesh* e l'altra, è necessario ridurre anche la dimensione delle celle delle *mesh* più esterne in modo che la differenza tra le loro dimensioni non sia troppo elevata, portando quindi ad un ulteriore aumento delle celle.

Quindi è possibile concludere, come si nota anche dalla Figura 5.6 e menzionato in precedenza, che se le risorse disponibili permettessero l'ottenimento delle curve HRR con griglie più fini, l'andamento tra le curve sarebbe sempre più simile, portando ad un probabile raggiungimento dell'indipendenza dei risultati dalla griglia.

## 5.5 CARATTERISTICHE DELL'INNESCO

In questa sezione viene descritto come sono state determinate le caratteristiche dell'innesco posto nelle simulazioni precedenti. È stato valutato il suo effetto sulla curva di potenza termica rilasciata, in base alle caratteristiche imposte nel tentativo di renderlo il più simile possibile all'innesco utilizzato nella prova sperimentale.

Nella prova d'incendio sperimentale è stato realizzato un innesco alla base della pila con una torcia alimentata a GPL, con fiamma tendente al colore arancione; per questi motivi, è realistico pensare, facendo riferimento alla Figura 1.2, che la sua temperatura sia compresa in un range tra 800°C e 1000°C. L'innesco, posto nell'intercapedine tra i bancali, è stato mantenuto in quel punto per circa 40 secondi, oltre i quali è stato tolto.

Nella simulazione l'innesco è stato modellato creando una superficie ad elevata temperatura che permette la pirolisi del materiale e la conseguente combustione. Per verificare se è possibile realizzare un innesco con le stesse caratteristiche della prova sperimentale e valutare l'influenza del tempo d'ignizione e della temperatura sulla curva di potenza termica rilasciata sono state effettuate diverse valutazioni.

### 5.5.1 TEMPO DI IGNIZIONE

In primo luogo, è stato verificato che il tempo d'ignizione di 40 secondi fosse sufficiente all'autosostentamento dell'incendio ed è stato valutato l'effetto del tempo di rimozione sulla potenza termica. In Figura 5.9 la curva di potenza termica rilasciata rimuovendo l'innesco a 40, 60, 100, 120 secondi e non effettuando nessuna rimozione; le prove sono state eseguite ad una temperatura di tentativo elevata, di 1500°C, per rendere evidente il processo di combustione con tempi di simulazione più brevi e con una *mesh* con celle di dimensioni di 0.05 m.

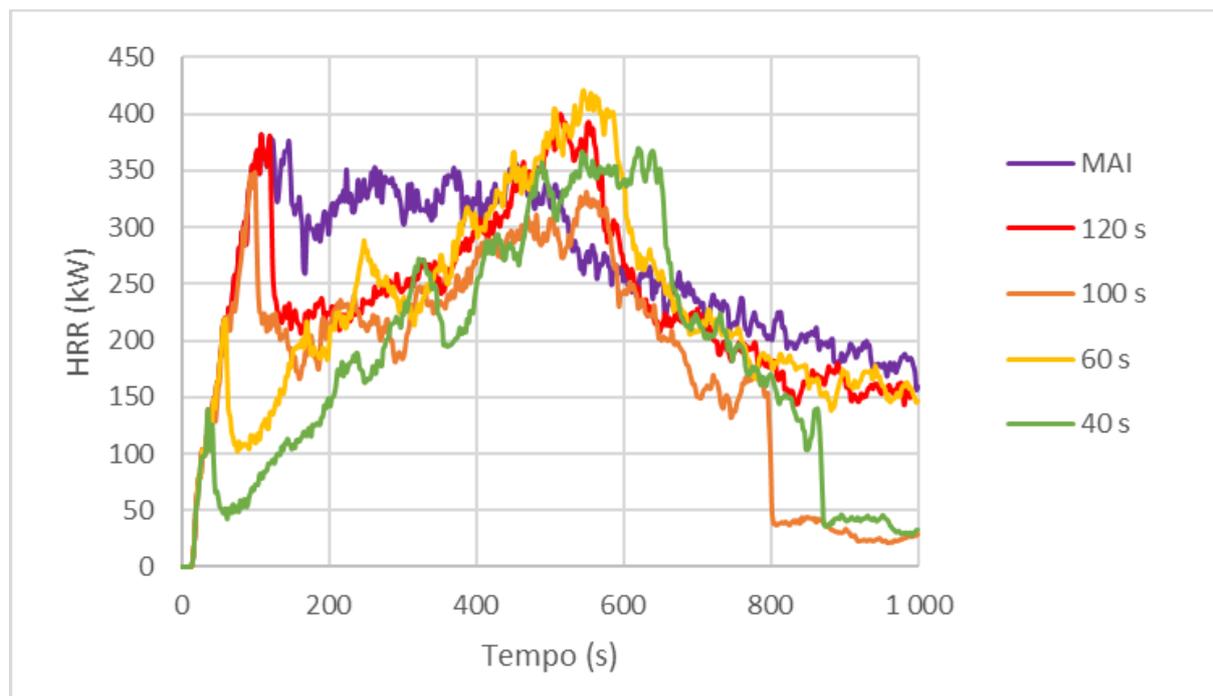


Figura 5.9 Confronto tra le curve HRR delle simulazioni con innesco rimosso a 120 s, 100 s, 60 s e 40 s

Il tempo d'ignizione di 40 secondi risulta sufficiente per l'autosostentamento della fiamma; quindi, il tempo di rimozione all'interno della simulazione può essere impostato coincidente con quello utilizzato nella prova sperimentale.

Dalla Figura 5.9 si deduce che una volta che la fiamma riesce ad autosostenersi, il materiale più vicino all'innesco procede con la reazione di combustione e lo sviluppo della potenza termica rilasciata è quasi indipendente dal tempo di ignizione. Infatti, la curva HRR risulta avere lo stesso andamento per ogni tempo di ignizione, arrivando ad un massimo che viene raggiunto a pochi istanti di differenza per ogni simulazione. Questa differenza è dovuta al diverso quantitativo di materiale che sta bruciando al momento in cui l'innesco viene tolto. Infatti, negli istanti in cui l'innesco è presente la potenza termica cresce per poi diminuire appena esso viene rimosso, ipotizzando quindi che parte del materiale non essendo più soggetto ad elevate temperature smetta di bruciare. Prima l'innesco viene tolto, minore è il quantitativo di materiale che continua a bruciare subito dopo la rimozione, poi la combustione procede, ma il quantitativo che brucia è leggermente diverso negli istanti, provocando un leggero discostamento tra i picchi che vengono raggiunti prima per tempi d'ignizione più lunghi. Questo è confermato anche dal caso in cui l'innesco non viene mai tolto, infatti, il picco

di potenza massima viene raggiunto più velocemente, perché la continua esposizione all'elevata temperatura porta più materiale adiacente a bruciare prima.

### 5.5.2 TEMPERATURA DELL'INNESCO

Per valutare l'effetto della temperatura dell'innesco è stata considerata la stessa simulazione con tempo di ignizione di 40 secondi, variando la temperatura della superficie scaldante. Partendo da un valore di tentativo elevato di 1500°C, in modo da garantire la combustione, la temperatura è stata ridotta per ogni simulazione per valutare l'effetto di questa variazione sulla potenza termica rilasciata e avvicinarsi al valore di temperatura dell'innesco utilizzato nella prova sperimentale. In Figura 5.10 la curva di potenza termica rilasciata al variare della temperatura, considerando un tempo d'ignizione di 40 secondi con una *mesh* con celle di dimensioni di 0.05 m e vista la mancata indipendenza dei risultati dalla griglia, con una *mesh* di 0.025 m.

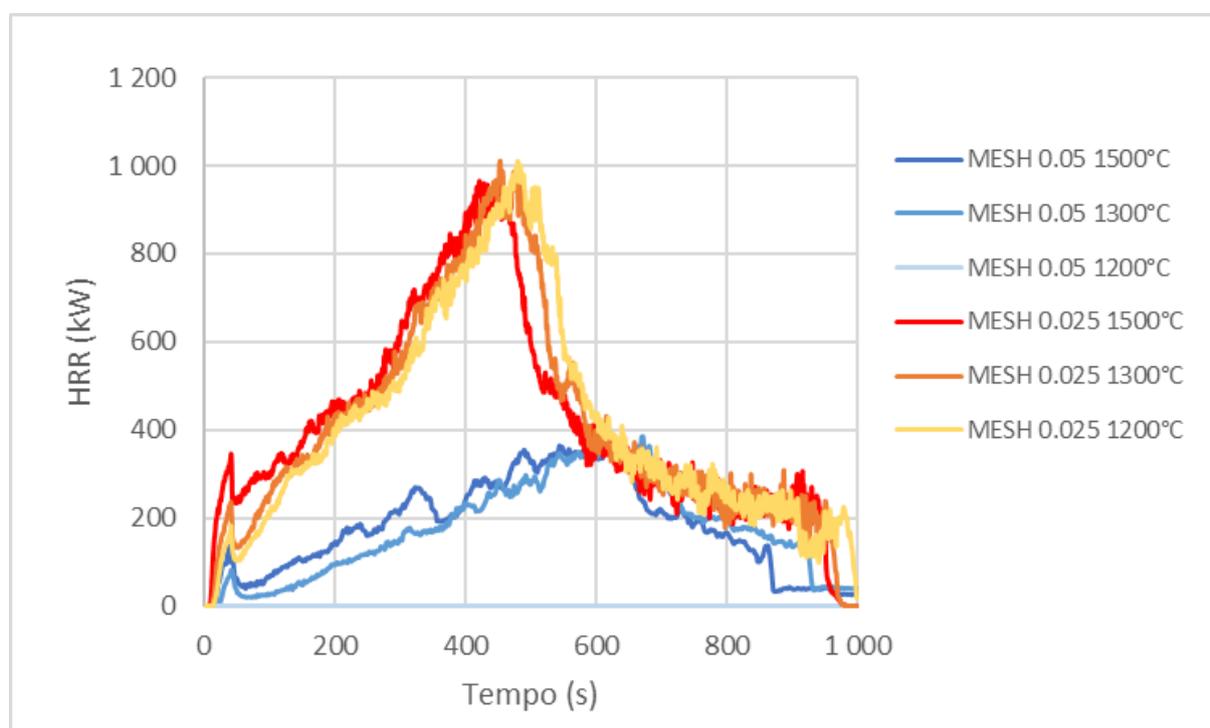


Figura 5.10 Confronto tra le curve HRR delle simulazioni con mesh di 0.5 m e 0.025 m con innesco alla temperatura di 1500°C, 1300°C e 1200°C

Al variare della temperatura le curve HRR hanno un andamento quasi sovrapponibile, fino ad arrivare al valore di 1200°C in cui per il tempo di ignizione di 40 secondi, la fiamma non riesce ad autosostenersi e la potenza termica diventa nulla. Perciò si può affermare che la temperatura dell'innesco ha una scarsa influenza sulla curva HRR una volta che il processo di combustione riesce a propagarsi, ma influisce nella fase iniziale dell'autosostentamento della fiamma.

Considerando l'innesco alla temperatura di 1200°C è stato riscontrato che con un tempo di ignizione più elevato la potenza termica rilasciata non si annulla e il processo di combustione riesce ad autosostenersi. Pertanto, con temperature inferiori, perché il processo di combustione riesca a continuare, è necessario un tempo d'ignizione più elevato.

Inoltre, come riscontrato nella sezione 5.4, i risultati non sono indipendenti dalle *mesh* utilizzate per le valutazioni, essendo esse troppe grossolane, ma tra le varie *mesh* i comportamenti riscontrati per lo studio dei vari parametri sono gli stessi. Perciò le osservazioni effettuate sono confermate, ma i risultati numerici sono differenti. Infatti, per la temperatura di 1200 °C, utilizzando la griglia di calcolo di dimensioni 0.025 m, la combustione riesce ad autosostenersi e l'andamento è simile a quello ottenuto per 1300°C e 1500°C.

Dalle osservazioni è possibile concludere che sia il tempo d'ignizione che la temperatura hanno una bassa influenza sulla curva di rilascio termico, una volta che la combustione riesce ad autosostenersi, mentre i valori possono essere determinanti se la loro combinazione non permette all'incendio di propagarsi.

Con le *mesh* utilizzate non è stato possibile ottenere contemporaneamente una simulazione con tempo d'ignizione e temperatura dell'innesco pari a quelle della prova sperimentale; tuttavia, è lecito aspettarsi che diminuendo le dimensioni della *mesh* si riesca a raggiungere una simulazione con un tempo d'ignizione di 40 secondi e temperatura d'innesco di 800°C – 1000°C senza che il processo di combustione si fermi.

## 5.6 CONFRONTO TRA I MODELLI DI COMBUSTIONE

Come presentato nella sezione 4.2 all'interno del software la reazione di combustione può essere simulata tramite due modelli: *Simple Chemistry* e *Complex Stoichiometry*. In questa sezione essi vengono confrontati, attraverso la curva HRR ottenuta da due simulazioni aventi come unica differenza il modello di combustione. Le simulazioni sono state effettuate con la griglia di calcolo definita secondo quanto approfondito all'interno della sezione 5.4 e con le caratteristiche dell'innesco secondo le osservazioni della sezione 5.5. In APPENDICE gli script delle simulazioni, SIMULAZIONE A e SIMULAZIONE C, si riferiscono rispettivamente al modello *Simple Chemistry* e *Complex Stoichiometry*. In Figura 5.11 sono mostrate le curve HRR delle due simulazioni.

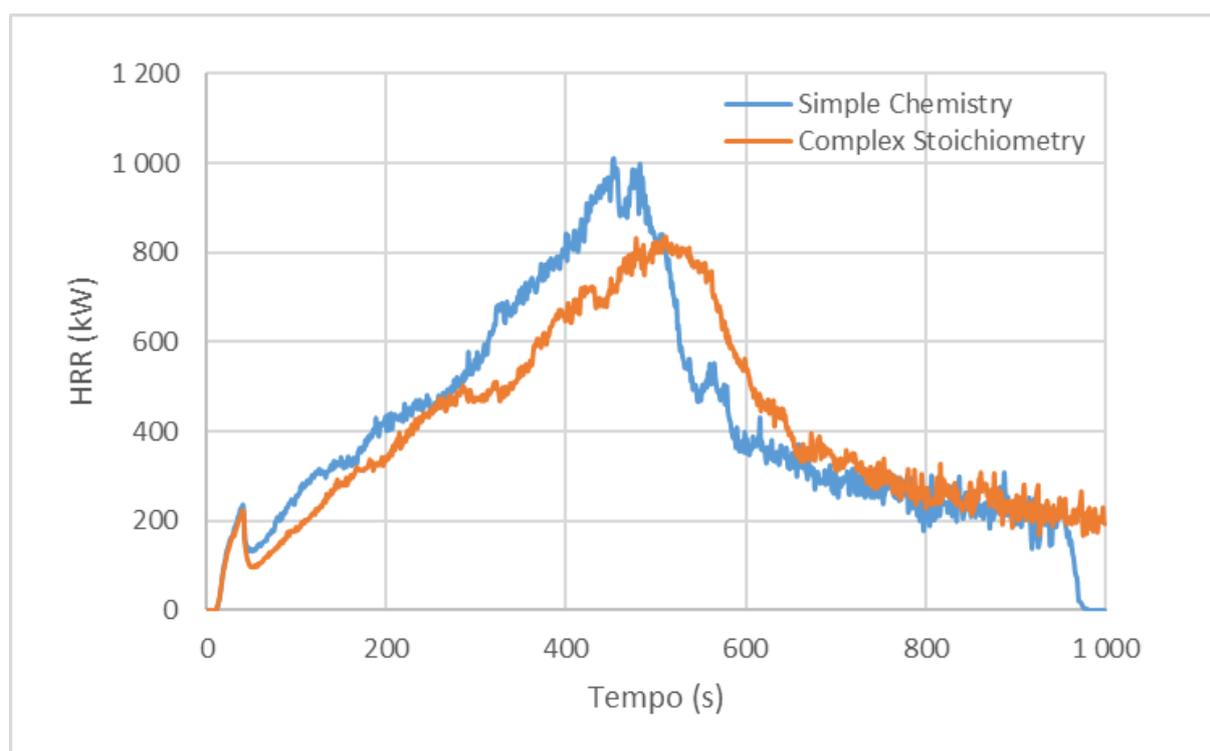


Figura 5.11 Confronto tra le curve HRR ottenute dalle simulazioni con il modello *Simple Chemistry* e *Complex Stoichiometry*

Dalla Figura 5.11 si nota che i modelli per simulare la reazione di combustione forniscono per la curva HRR due andamenti molto simili, anche se il modello di tipo *Complex Stoichiometry* porta ad ottenere un picco meno elevato. Da ciò si può dedurre che la tipologia di modello di

combustione non risulta essere molto influente sulla curva HRR, pertanto, ai fini della scelta di una simulazione con cui confrontare i risultati ottenuti dai dati sperimentali, il modello di combustione da utilizzare non è determinante. Tuttavia, per confrontare la curva ottenuta tramite l'applicazione della normativa, viene scelto il modello di stechiometria complessa che risulta essere più preciso perché permette di tenere conto della presenza dell'aria.

## 5.7 CARATTERISTICHE DEL MODELLO PIÙ REALISTICO

All'interno di questa sezione sono riassunte le caratteristiche scelte per la versione finale del modello considerato più realistico, da cui ottenere la simulazione con cui confrontare i risultati ottenuti dall'applicazione della normativa ai dati sperimentali.

Sulla base delle valutazioni effettuate all'interno del capitolo sono emerse le seguenti osservazioni che giustificano le caratteristiche scelte.

- Come modello di trasferimento del calore è stato scelto il modello in 3D, perché rappresenta una modalità di trasferimento più realistica i cui risultati sono indipendenti dallo spessore del materiale richiesto per il modello in 1D.
- La *mesh* di calcolo che può fornire i risultati più precisi e un tempo ancora ragionevole è rappresentata dalla griglia con celle di dimensioni di 0.025 m, che è stata quindi scelta per essere utilizzata nella simulazione in corrispondenza dell'intercapedine. Inoltre, il dominio è stato diviso in un numero di *mesh* tali da poter assegnare celle di dimensioni maggiori, pari a 0.05 m e 0.10 m, nelle zone di criticità inferiore, nello spazio ai lati dell'intercapedine, in modo da ottenere un costo computazionale più contenuto.
- Alla *mesh* scelta, l'innesco non può essere modellato con le stesse caratteristiche della prova sperimentale, ma è stato scelto di tenere conto dello stesso tempo d'ignizione, di 40 secondi, mentre come temperatura, visto che le curve sono quasi sovrapponibili, affinché la combustione continui, è stato scelto 1300°C. Pertanto, nella simulazione è stato utilizzato un innesco a 1300°C, che viene rimosso dopo 40 secondi.
- Il modello di combustione non è risultato particolarmente influente sui risultati, ma è stato scelto il modello *Complex Stoichiometry* per tenere conto della presenza di aria.

## **6. CONFRONTO CON LE PROVE SPERIMENTALI**

All'interno di questo capitolo viene presentato il confronto tra i risultati ottenuti dalla simulazione con quelli derivanti dalla prova d'incendio. In particolare, vengono paragonate le curve HRR e l'espansione della fiamma nella simulazione e nel video del *fire-test*.

Diversamente dagli obiettivi proposti, il confronto tra la curva ottenuta dalla modellazione e quella derivante dall'applicazione della normativa NFPA ai dati sperimentali non può essere eseguito a regola d'arte e non è possibile trarre nessuna conclusione sull'accuratezza dell'approccio normativo, perché i risultati della simulazione non sono indipendenti dalla griglia di calcolo e la curva non può essere validata. Tuttavia, poiché la simulazione scelta rimane tutt'ora l'unica disponibile per confrontare la curva derivante dalla prova d'incendio, esse vengono ugualmente paragonate.

Per ridurre i costi computazionali, le simulazioni sono state svolte solo con un quarto del materiale contenuto all'interno della pila di bancali, quindi, visto che non è possibile effettuare la modellazione con la geometria completa, perché il numero di celle è troppo elevato da poter essere calcolato con le risorse a disposizione, il confronto viene effettuato attraverso il rateo di crescita della curva.

Ipotizzando che nella prima fase la curva di potenza termica rilasciata dipenda solo dal materiale che brucia vicino all'innesco, perché il materiale più lontano non viene raggiunto dalle fiamme, è possibile svolgere il paragone solo con un quarto della pila di bancali, fino all'istante in cui il video della prova non mostra l'incendio espandersi anche sulle parti non modellate. Esso corrisponde circa all'istante di 110 secondi, oltre il quale la fiamma comincia a bruciare anche la parte superiore della pila non compresa all'interno del modello. In Figura 6.1 la curva di potenza termica rilasciata derivante dalla normativa NFPA fino all'istante di 110 secondi e la curva ottenuta dalla simulazione.

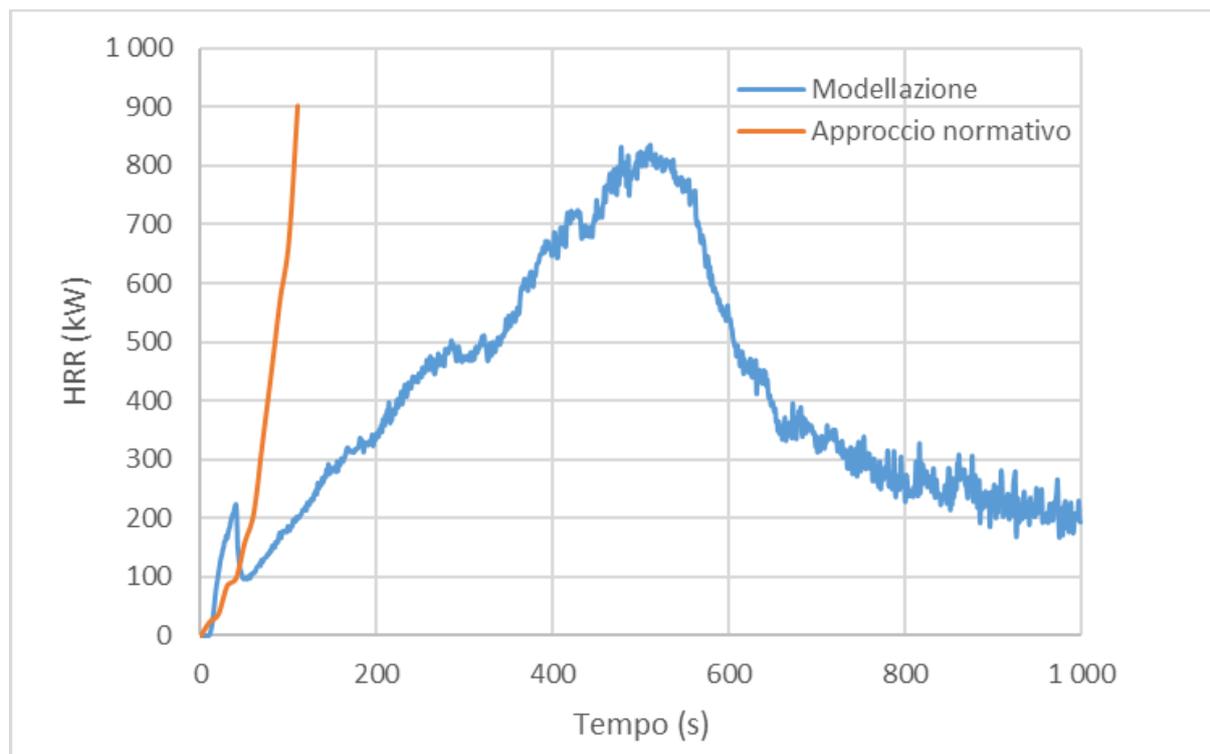
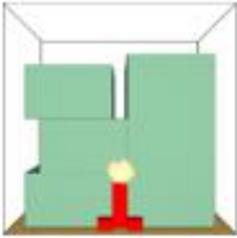
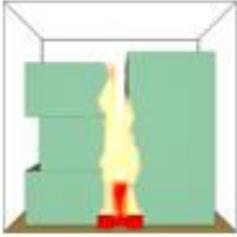
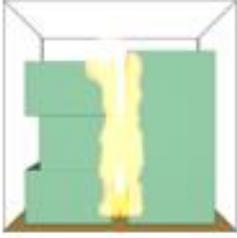


Figura 6.1 Confronto tra le curve HRR derivanti dalla modellazione e dall'approccio normativo

Dalla Figura 6.1 si nota che le curve raggiungono un valore di picco confrontabile, ma in un arco di tempo molto differente. Infatti, la curva calcolata dalla modellazione raggiunge il valore massimo solamente intorno ai 500 secondi, mentre nella prova sperimentale in quell'istante la pila è già crollata come descritto nel capitolo 3.

È stato confrontato il rateo di crescita delle curve, approssimandole all'andamento di tipo parabolico secondo l'equazione  $HRR = \alpha \cdot t^2$  come descritto nella sezione 0. Valutando il valore di  $\alpha$  attraverso il metodo dei minimi quadrati come descritto nella sezione 3.2, il valore del rateo di crescita della curva derivante dall'approccio normativo, fino a 110 secondi, risulta essere di  $0.070 \text{ kJ/s}^3$ . La costante ricavata per la simulazione calcolata fino al valore di picco massimo, corrispondente a 478 secondi, risulta invece di  $0.0043 \text{ kJ/s}^3$ . Infatti, la curva determinata dalla simulazione risulta meno pendente.

In Figura 6.2 sono inoltre paragonati nei vari istanti la simulazione e il video della prova d'incendio per visualizzare la diversa espansione della fiamma.

	
<p>12 s</p>	
	
<p>20 s</p>	
	
<p>40 s</p>	

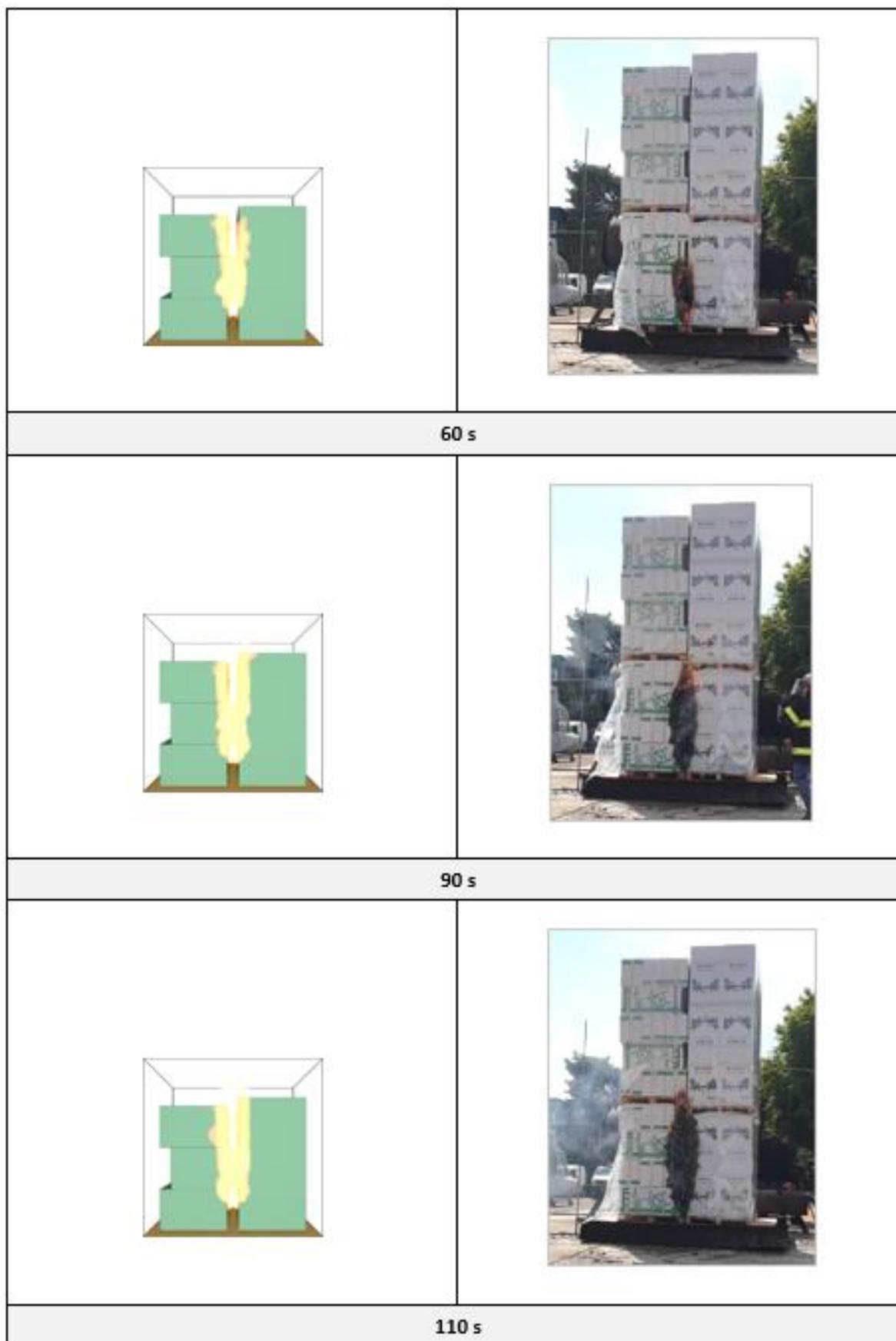


Figura 6.2 Confronto nei vari istanti indicati tra la simulazione e il video della prova d'incendio

Nella simulazione l'espansione della fiamma avviene molto più velocemente, mentre nel video risulta essere più graduale. Infatti, nella simulazione la fiamma si espande in pochi secondi fino alla cima dei due bancali modellati per poi rimanere costante in altezza; successivamente le fiamme si espandono verso l'interno portando a bruciare anche le celle all'interno della pila che contribuiscono all'energia termica rilasciata quindi alla crescita della curva HRR nella fase iniziale. Nella prova sperimentale l'incendio si espande più lentamente ed è possibile in questo caso notare l'espansione graduale sia in altezza che in larghezza. Nonostante nei vari secondi l'altezza raggiunta dalla fiamma risulti essere molto diversa, a causa della sua crescita immediata nella simulazione, la fiamma tende ad avere circa la stessa larghezza in entrambi i casi, assumendo negli ultimi istanti una forma molto simile.

## CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi si è concentrato sulla modellazione della curva di potenza termica rilasciata (HRR – *Heat Release Rate*) di un incendio di merce di materiale plastico attraverso la simulazione CFD (*Computational Fluid Dynamics*), utilizzando il software FDS (*Fire Dynamics Simulator*). I risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti seguendo l'approccio proposto dalla normativa NFPA 921, che permette di stimare la curva HRR a partire dall'altezza di fiamma misurata sperimentalmente.

L'attività di messa a punto della simulazione ha presentato diverse sfide dal punto di vista modellistico ed evidenziato alcune criticità. In particolare, l'opportunità di riprodurre i fenomeni attraverso più modelli alternativi ha reso necessaria l'analisi approfondita di tali modelli al fine di scegliere quelli considerati più opportuni. Inoltre, ha introdotto l'esigenza di schematizzare il fenomeno dell'incendio in modo da poterlo modellare all'interno del software introducendo approssimazioni e ipotesi semplificative.

Infatti, nella prima fase di modellazione è stato necessario definire i dati di input, introducendo l'ipotesi semplificativa di utilizzare un unico materiale, vista l'impossibilità di tenere conto dei vari materiali presenti all'interno della pila, approssimando le reazioni coinvolte, di pirolisi e combustione, solamente a quelle del polipropilene.

Parallelamente all'impostazione dei dati di input sono stati valutati i diversi modelli per la riproduzione dei fenomeni. Essi sono stati confrontati tra loro attraverso la curva di potenza termica rilasciata. In particolare, per il meccanismo di trasferimento del calore è stato scelto il modello in 3D perché permette di svincolarsi dalla determinazione dei parametri geometrici da impostare, come lo spessore di materiale, e sembra fornire una curva più realistica. Invece, i modelli per la reazione di combustione sono risultati molto simili ma è stato scelto il modello di tipo *Complex Stoichiometry* per tenere conto della presenza di aria.

È stato inoltre eseguito uno studio di indipendenza dalla griglia, come richiesto per le modellazioni di fluidodinamica computazionale e questo ha evidenziato l'elevata limitazione delle risorse di calcolo disponibili rispetto al modello da simulare. Infatti, con le griglie di

calcolo più fini raggiungibili, non è stato possibile ottenere l'indipendenza dei risultati dalla griglia e quindi i valori raggiunti della potenza termica rilasciata non sono stati validati. Il motivo di tale problema non è correlato ai parametri di modellazione dei fenomeni dell'incendio ma alla geometria dei bancali, che presentando fessure di dimensioni molto strette, confrontabili con le celle della griglia, al variare della griglia di calcolo ha condotto a risultati molto diversi. Tuttavia, raffinando la griglia, la distanza tra le curve HRR diminuisce, suggerendo che non si è lontani dal raggiungere una dimensione delle celle per cui i risultati siano indipendenti dalla *mesh*. Ad ogni modo, a parità di griglia di calcolo, tutte le valutazioni effettuate sui modelli e i parametri si possono considerare valide.

Con la griglia più fine impostata non è stato possibile realizzare l'innesco con le stesse caratteristiche della prova d'incendio, perché il tempo d'ignizione e la temperatura utilizzati non permettono l'autosostentamento della fiamma all'interno della simulazione. Per questo motivo è stato valutato l'effetto della temperatura e del tempo di rimozione dell'innesco in modo da assicurarsi che la differenza nelle caratteristiche impostate non influisse in modo rilevante sulla potenza termica rilasciata. I risultati hanno evidenziato una leggerissima dipendenza della curva da questi parametri; perciò, al fine del confronto delle curve HRR, è possibile considerare l'innesco modellato simile a quello della prova d'incendio.

Inoltre, con le risorse di calcolo a disposizione, con la griglia più raffinata, non è stato possibile valutare la simulazione con l'intera geometria per mancanza di potenza di calcolo, ma sono stati considerati solo un quarto dei bancali presenti nella pila.

Nonostante le limitazioni della simulazione, essa rappresenta l'unica disponibile con cui confrontare la prova d'incendio e la curva ottenuta dall'applicazione della normativa. Vista la modellazione solo di un quarto dei bancali, le curve sono state paragonate attraverso il rateo di crescita della fase iniziale, prima che l'espansione della fiamma raggiungesse parti della pila non modellate all'interno del software. Vista la mancata validazione della curva HRR della simulazione, non è però stato possibile trarre nessun giudizio sulla qualità della curva derivante dell'approccio normativo; le curve raggiungono un valore di picco molto simile, anche se in istanti estremamente diversi. Inoltre, l'espansione della fiamma nella simulazione

risulta essere molto diversa da quella nella prova d'incendio, ma all'istante finale considerato, la porzione di figura occupata dalla fiamma nei due casi è molto simile.

L'impiego di un software CFD per la determinazione della curva HRR, rappresenta un approccio più avanzato rispetto all'applicazione della normativa NFPA, perché permette di fornire una curva più precisa che tiene conto dei fenomeni chimici e fisici che governano lo sviluppo dell'incendio. Tuttavia, allo stato attuale, le risorse di calcolo richieste sono talmente elevate che questo approccio non può essere applicato in maniera ingegneristica e il metodo suggerito dalla normativa NFPA, anche se basato sull'utilizzo di una relazione estremamente semplificata, rimane tutt'ora l'unico applicabile. Per tale motivo nello studio antincendio del magazzino di merce di materiale plastico non è possibile realizzare una simulazione che fornisca come dato di output anche la curva HRR, ma è necessario impostare come dato di input quella ricavata dall'utilizzo della normativa.

Ipotizzando in un futuro di avere disponibili risorse di calcolo con potenze sempre maggiori, in grado di elaborare i risultati del modello realizzato, questo approccio potrà essere utilizzato. Infatti, una volta individuata una dimensione della cella che permetta di ottenere risultati indipendenti dalla griglia di calcolo, sarebbe possibile impostare le modellazioni basandosi sulla simulazione dettagliata dei fenomeni che avvengono durante l'incendio e ottenere direttamente come dato di output la curva di potenza termica rilasciata.

## ELENCO FIGURE

Figura 1.1 Triangolo del fuoco (fonte: gt-engineering.it).....	10
Figura 1.2 Colore della fiamma in relazione alla temperatura (fonte: vigilfuoco.it) .....	13
Figura 1.3 Colore dei fumi in relazione al tipo di combustibile (fonte: vigilfuoco.it) .....	14
Figura 1.4 Fasi di sviluppo di un incendio .....	15
Figura 1.5 Andamento della potenza termica rilasciata (Mauro Malizia, n.d.) .....	21
Figura 1.6 Curve di sviluppo di un incendio .....	22
Figura 2.1 Schema di un modello a due zone (fonte: infobuild.it).....	26
Figura 2.2 Scala della turbolenza del moto di un fluido all'interno di un tubo (Andersson, 2011).....	32
Figura 2.3 Flusso di energia a cascata (Andersson, 2011) .....	33
Figura 3.1 Foto dell'incendio nei vari istanti del test .....	42
Figura 3.2 Curva HRR calcolata tramite la normativa NFPA 921.....	43
Figura 3.3 Confronto tra l'andamento di crescita determinato e quelli caratteristici per gli incendi fast e ultrafast.....	45
Figura 4.1 Raffigurazione del modello di trasferimento di calore in 3D .....	56
Figura 5.1 Pila di bancali utilizzata durante la prova d'incendio.....	59
Figura 5.2 Curva termo-gravimetrica del polipropilene alla rampa di 10 K/min .....	63
Figura 5.3 Curva della velocità di variazione della massa in funzione del tempo .....	64
Figura 5.4 Configurazione geometrica considerata per tutte le valutazioni successive.....	68
Figura 5.5 Confronto tra le curve HRR ottenute dalle simulazioni con il modello in 3D e in 1D .....	70
Figura 5.6 Confronto tra le curve HRR calcolate per la stessa simulazione alle diverse mesh di celle di dimensioni di 0.1 m, 0.5 m, 0.025 m e 0.0125 m .....	72
Figura 5.7 Mesh all'intercapedine di 0.10 m (A), 0.05 m (B) e 0.025 m (C) .....	74
Figura 5.8 Andamento delle temperature di parete all'istante di 50 s dall'inizio della simulazione, per le mesh di grandezza 0.10 m (A), 0.05 m (B) e 0.025 m (C) .....	75
Figura 5.9 Confronto tra le curve HRR delle simulazioni con innesco rimosso a 120 s, 100 s, 60 s e 40 s.....	78

Figura 5.10 Confronto tra le curve HRR delle simulazioni con mesh di 0.5 m e 0.025 m con innesco alla temperatura di 1500°C, 1300°C e 1200°C .....	79
<i>Figura 5.11 Confronto tra le curve HRR ottenute dalle simulazioni con il modello Simple Chemistry e Complex Stoichiometry</i> .....	81
Figura 6.1 Confronto tra le curve HRR derivanti dalla modellazione e dall'approccio normativo .....	84
Figura 6.2 Confronto nei vari istanti indicati tra la simulazione e il video della prova d'incendio .....	86

## **ELENCO TABELLE**

Tabella 1.1 Classificazione degli incendi .....	11
Tabella 1.2 Parametri curve di sviluppo di un incendio .....	22
Tabella 4.1 Tipologie di densità.....	53
Tabella 5.1 Dimensioni della pila .....	60
Tabella 5.2 Massa dei materiali presenti nei bancali di sinistra .....	60
Tabella 5.3 Massa dei materiali presenti nei bancali di destra.....	61
Tabella 5.4 Riassunto della massa dei materiali presenti nella pila.....	61
Tabella 5.5 Entalpie di formazione del propilene e del monomero di polipropilene .....	65
Tabella 5.6 Composizione dell'aria.....	67
Tabella 5.7 Larghezza del canale in funzione delle dimensioni delle celle .....	74
Tabella 5.8 Previsione del numero di celle che si formano per ciascuna cella al variare della mesh .....	76

## APPENDICE

### CALCOLO SPESSORE

Massa totale di materiale	960.01	kg				
Massa di un quarto di materiale	240.00	kg				
Densità media	44.44	kg/m <sup>3</sup>				
VOLUME DI MATERIALE						
	Lato sinistro		Lato destro			
	Dimensioni scatola		Dimensioni del blocco			
Larghezza	0.6	m	0.6	m		
Altezza	0.5	m	1.6	m		
Profondità	1.2	m	1.2	m		
Spessore	0.32	m	0.32	m		
Numero degli oggetti presenti	3		1		Totale	
Volume di materiale	3.1104	m <sup>3</sup>	2.304	m <sup>3</sup>	5.4144	m <sup>3</sup>
Massa di polipropilene nello spessore	240.62	kg				
Massa di un quarto di materiale	240.00	kg				

### SIMULAZIONE A

```
&HEAD CHID='MESH_0_025_con_innesco_40_a_1300'/
&TIME T_END=1000.0/
&DUMP COLUMN_DUMP_LIMIT=.TRUE., DT_RESTART=100.0, DT_SL3D=0.25/
&MISC BAROCLINIC=.FALSE./
```

```
&MESH ID='Mesh01', IJK=12,20,80, XB=1.4,1.7,-0.2,0.3,0.0,2.0/
&MESH ID='Mesh02', IJK=12,20,80, XB=1.4,1.7,0.3,0.8,0.0,2.0/
&MESH ID='Mesh03', IJK=12,20,80, XB=1.4,1.7,0.8,1.3,0.0,2.0/
&MESH ID='Mesh04', IJK=4,30,40, XB=1.2,1.4,-0.2,1.3,0.0,2.0/
&MESH ID='Mesh06', IJK=4,30,40, XB=1.7,1.9,-0.2,1.3,0.0,2.0/
&MESH ID='Mesh05', IJK=4,15,20, XB=0.8,1.2,-0.2,1.3,0.0,2.0/
&MESH ID='Mesh07', IJK=4,15,20, XB=1.9,2.3,-0.2,1.3,0.0,2.0/
```

```
&REAC ID='Reac Propilene',
  FUEL='PROPYLENE',
  AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=455.0,
  SOOT_H_FRACTION=6.0E-3,
  CO_YIELD=0.017,
  SOOT_YIELD=0.095,
  HEAT_OF_COMBUSTION=4.64E+4,
  C=3.0,
  H=6.0/
```

&DEVC ID='TIMER->OUT', QUANTITY='TIME', XYZ=1.4,-0.2,0.0, SETPOINT=40.0,  
INITIAL\_STATE=.TRUE./

&MATL ID='POLYPROPYLENE',  
SPECIFIC\_HEAT=2.16,  
CONDUCTIVITY=0.2,  
DENSITY=44.44,  
HEAT\_OF\_COMBUSTION=4.331E+4,  
N\_REACTIONS=1,  
HEAT\_OF\_REACTION=2440.0,  
SPEC\_ID(1,1)='PROPYLENE',  
NU\_SPEC(1,1)=1.0,  
REFERENCE\_TEMPERATURE=452.0,  
HEATING\_RATE=10.0,  
PYROLYSIS\_RANGE=120.0/

&SURF ID='POLYPROPYLENE',  
RGB=146,202,166,  
BURN\_AWAY=.TRUE.,  
BACKING='VOID',  
MATL\_ID(1,1)='POLYPROPYLENE',  
MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0,  
THICKNESS(1)=0.05,  
HT3D=T/

&SURF ID='HOT',  
COLOR='RED',  
TMP\_FRONT=1300.0/

&OBST ID='INNESCO', XB=1.5,1.6,0.0,0.1,0.0,0.4, SURF\_ID='HOT', DEVC\_ID='TIMER->OUT'/  
&OBST ID='INNESCO', XB=1.5,1.6,0.1,0.2,5.551115E-17,0.1, SURF\_ID='HOT',  
DEVC\_ID='TIMER->OUT'/

&OBST ID='INNESCO', XB=1.402045,1.502045,-0.1,-2.775558E-17,2.775558E-17,0.1,  
SURF\_ID='HOT', DEVC\_ID='TIMER->OUT'/

&OBST ID='INNESCO', XB=1.6,1.7,-0.1,0.0,0.0,0.1, SURF\_ID='HOT', DEVC\_ID='TIMER->OUT'/

&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=1.6,2.2,0.0,1.2,0.0,1.6, SURF\_ID='POLYPROPYLENE',  
HT3D=T/

&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=0.9,1.5,0.0,1.2,0.0,0.5, SURF\_ID='POLYPROPYLENE',  
HT3D=T/

&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=1.0,1.6,5.551115E-17,1.2,0.5,1.0,  
SURF\_ID='POLYPROPYLENE', HT3D=T/

&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=0.9,1.5,0.0,1.2,1.0,1.5, SURF\_ID='POLYPROPYLENE',  
HT3D=T/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [YMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,-0.2,-0.2,0.0,2.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,-0.2,0.3,2.0,2.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,0.3,0.8,2.0,2.0/

```
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh03 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh03 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,0.8,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh04 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.2,1.4,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh04 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=1.2,1.4,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh04 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.2,1.4,-0.2,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.7,1.9,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=1.7,1.9,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.7,1.9,-0.2,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,0.8,-0.2,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,1.2,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,1.2,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,1.2,-0.2,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=2.3,2.3,-0.2,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.9,2.3,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=1.9,2.3,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.9,2.3,-0.2,1.3,2.0,2.0/
```

```
&BNDF QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE'/
```

```
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/
```

```
&TAIL /
```

## **SIMULAZIONE B**

```
&HEAD CHID='MESH_0_025_con spessore'/
```

```
&TIME T_END=1000.0/
```

```
&DUMP COLUMN_DUMP_LIMIT=.TRUE., DT_RESTART=100.0, DT_SL3D=0.25/
```

```
&MISC BAROCLINIC=.FALSE./
```

```
&MESH ID='Mesh01', IJK=12,20,80, XB=1.4,1.7,-0.2,0.3,0.0,2.0/
```

```
&MESH ID='Mesh02', IJK=12,20,80, XB=1.4,1.7,0.3,0.8,0.0,2.0/
```

```
&MESH ID='Mesh03', IJK=12,20,80, XB=1.4,1.7,0.8,1.3,0.0,2.0/
```

```
&MESH ID='Mesh04', IJK=4,30,40, XB=1.2,1.4,-0.2,1.3,0.0,2.0/
```

```
&MESH ID='Mesh06', IJK=4,30,40, XB=1.7,1.9,-0.2,1.3,0.0,2.0/
```

```
&MESH ID='Mesh05', IJK=4,15,20, XB=0.8,1.2,-0.2,1.3,0.0,2.0/
```

```
&MESH ID='Mesh07', IJK=4,15,20, XB=1.9,2.3,-0.2,1.3,0.0,2.0/
```

```
&REAC ID='Reac Propilene',
```

```
  FUEL='PROPYLENE',
```

```
  AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=455.0,
```

```
  SOOT_H_FRACTION=6.0E-3,
```

```
  CO_YIELD=0.017,
```

```
  SOOT_YIELD=0.095,
```

```
  HEAT_OF_COMBUSTION=4.64E+4,
```

C=3.0,  
H=6.0/

&DEVC ID='TIMER->OUT', QUANTITY='TIME', XYZ=1.4,-0.2,0.0, SETPOINT=40.0,  
INITIAL\_STATE=.TRUE./

&MATL ID='POLYPROPYLENE',  
SPECIFIC\_HEAT=2.16,  
CONDUCTIVITY=0.2,  
DENSITY=44.44,  
HEAT\_OF\_COMBUSTION=4.331E+4,  
N\_REACTIONS=1,  
HEAT\_OF\_REACTION=2440.0,  
SPEC\_ID(1,1)='PROPYLENE',  
NU\_SPEC(1,1)=1.0,  
REFERENCE\_TEMPERATURE=452.0,  
HEATING\_RATE=10.0,  
PYROLYSIS\_RANGE=120.0/

&SURF ID='POLYPROPYLENE',  
RGB=146,202,166,  
BURN\_AWAY=.TRUE.,  
BACKING='VOID',  
MATL\_ID(1,1)='POLYPROPYLENE',  
MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0,  
THICKNESS(1)=0.32/

&SURF ID='HOT',  
COLOR='RED',  
TMP\_FRONT=1300.0/

&OBST ID='INNESCO', XB=1.5,1.6,0.0,0.1,0.0,0.4, SURF\_ID='HOT', DEVC\_ID='TIMER->OUT'/  
&OBST ID='INNESCO', XB=1.5,1.6,0.1,0.2,5.551115E-17,0.1, SURF\_ID='HOT',  
DEVC\_ID='TIMER->OUT'/

&OBST ID='INNESCO', XB=1.402045,1.502045,-0.1,-2.775558E-17,2.775558E-17,0.1,  
SURF\_ID='HOT', DEVC\_ID='TIMER->OUT'/

&OBST ID='INNESCO', XB=1.6,1.7,-0.1,0.0,0.0,0.1, SURF\_ID='HOT', DEVC\_ID='TIMER->OUT'/

&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=1.6,2.2,0.0,1.2,0.0,1.6, SURF\_ID='POLYPROPYLENE'/

&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=0.9,1.5,0.0,1.2,0.0,0.5, SURF\_ID='POLYPROPYLENE'/

&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=1.0,1.6,5.551115E-17,1.2,0.5,1.0,  
SURF\_ID='POLYPROPYLENE'/

&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=0.9,1.5,0.0,1.2,1.0,1.5, SURF\_ID='POLYPROPYLENE'/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [YMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,-0.2,-0.2,0.0,2.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,-0.2,0.3,2.0,2.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,0.3,0.8,2.0,2.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh03 [YMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,1.3,1.3,0.0,2.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh03 [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,0.8,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh04 [YMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.2,1.4,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh04 [YMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.2,1.4,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh04 [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.2,1.4,-0.2,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [YMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.7,1.9,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [YMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.7,1.9,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.7,1.9,-0.2,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [XMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=0.8,0.8,-0.2,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [YMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=0.8,1.2,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [YMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=0.8,1.2,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=0.8,1.2,-0.2,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [XMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=2.3,2.3,-0.2,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [YMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.9,2.3,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [YMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.9,2.3,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=1.9,2.3,-0.2,1.3,2.0,2.0/

&BNDF QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE'/  
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&TAIL /

## **SIMULAZIONE C**

&HEAD CHID='MESH\_0\_025\_con\_innesco\_40\_a\_1300'/  
&TIME T\_END=1000.0/  
&DUMP COLUMN\_DUMP\_LIMIT=.TRUE., DT\_RESTART=100.0, DT\_SL3D=0.25/  
&MISC BAROCLINIC=.FALSE./

&MESH ID='Mesh01', IJK=12,20,80, XB=1.4,1.7,-0.2,0.3,0.0,2.0/  
&MESH ID='Mesh02', IJK=12,20,80, XB=1.4,1.7,0.3,0.8,0.0,2.0/  
&MESH ID='Mesh03', IJK=12,20,80, XB=1.4,1.7,0.8,1.3,0.0,2.0/  
&MESH ID='Mesh04', IJK=4,30,40, XB=1.2,1.4,-0.2,1.3,0.0,2.0/  
&MESH ID='Mesh06', IJK=4,30,40, XB=1.7,1.9,-0.2,1.3,0.0,2.0/  
&MESH ID='Mesh05', IJK=4,15,20, XB=0.8,1.2,-0.2,1.3,0.0,2.0/  
&MESH ID='Mesh07', IJK=4,15,20, XB=1.9,2.3,-0.2,1.3,0.0,2.0/

&SPEC ID='OXYGEN', LUMPED\_COMPONENT\_ONLY=.TRUE./  
&SPEC ID='WATER VAPOR', LUMPED\_COMPONENT\_ONLY=.TRUE./  
&SPEC ID='NITROGEN', LUMPED\_COMPONENT\_ONLY=.TRUE./  
&SPEC ID='CARBON DIOXIDE'/  
&SPEC ID='CARBON MONOXIDE'/  
&SPEC ID='PROPYLENE'/  
&SPEC ID='HYDROGEN'/

```
&SPEC ID='AIR', BACKGROUND=.TRUE.,  
  SPEC_ID(1)='OXYGEN',  
  SPEC_ID(2)='NITROGEN',  
  SPEC_ID(3)='WATER VAPOR',  
  SPEC_ID(4)='CARBON DIOXIDE',  
  VOLUME_FRACTION(1)=0.2076,  
  VOLUME_FRACTION(2)=0.7825,  
  VOLUME_FRACTION(3)=9.5E-3,  
  VOLUME_FRACTION(4)=4.0E-4/
```

```
&SPEC ID='PRODUCTS 2',  
  SPEC_ID(1)='CARBON DIOXIDE',  
  SPEC_ID(2)='WATER VAPOR',  
  SPEC_ID(3)='NITROGEN',  
  VOLUME_FRACTION(1)=0.1298,  
  VOLUME_FRACTION(2)=0.1383,  
  VOLUME_FRACTION(3)=0.7318/
```

```
&REAC ID='Reaction2',  
  HEAT_OF_COMBUSTION=4.64E+4,  
  FUEL='PROPYLENE',  
  SPEC_ID_NU='AIR','PROPYLENE','PRODUCTS 2',  
  NU=-21.6763,-1.0,23.1763,  
  CHECK_ATOM_BALANCE=.FALSE./
```

```
&DEVC ID='TIMER->OUT', QUANTITY='TIME', XYZ=1.4,-0.2,0.0, SETPOINT=40.0,  
INITIAL_STATE=.TRUE./
```

```
&MATL ID='POLYPROPYLENE',  
  SPECIFIC_HEAT=2.16,  
  CONDUCTIVITY=0.2,  
  DENSITY=44.44,  
  HEAT_OF_COMBUSTION=4.331E+4,  
  N_REACTIONS=1,  
  HEAT_OF_REACTION=2440.0,  
  SPEC_ID(1,1)='PROPYLENE',  
  NU_SPEC(1,1)=1.0,  
  REFERENCE_TEMPERATURE=452.0,  
  HEATING_RATE=10.0,  
  PYROLYSIS_RANGE=120.0/
```

```
&SURF ID='POLYPROPYLENE',  
  RGB=146,202,166,  
  BURN_AWAY=.TRUE.,  
  BACKING='VOID',  
  MATL_ID(1,1)='POLYPROPYLENE',  
  MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
```

```
THICKNESS(1)=0.05,  
HT3D=T/  
&SURF ID='HOT',  
COLOR='RED',  
TMP_FRONT=1300.0/  
  
&OBST ID='INNESCO', XB=1.5,1.6,0.0,0.1,0.0,0.4, SURF_ID='HOT', DEVC_ID='TIMER->OUT'/  
&OBST ID='INNESCO', XB=1.5,1.6,0.1,0.2,5.551115E-17,0.1, SURF_ID='HOT',  
DEVC_ID='TIMER->OUT'/  
&OBST ID='INNESCO', XB=1.402045,1.502045,-0.1,-2.775558E-17,2.775558E-17,0.1,  
SURF_ID='HOT', DEVC_ID='TIMER->OUT'/  
&OBST ID='INNESCO', XB=1.6,1.7,-0.1,0.0,0.0,0.1, SURF_ID='HOT', DEVC_ID='TIMER->OUT'/  
&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=1.6,2.2,0.0,1.2,0.0,1.6, SURF_ID='POLYPROPYLENE',  
HT3D=T/  
&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=0.9,1.5,0.0,1.2,0.0,0.5, SURF_ID='POLYPROPYLENE',  
HT3D=T/  
&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=1.0,1.6,5.551115E-17,1.2,0.5,1.0,  
SURF_ID='POLYPROPYLENE', HT3D=T/  
&OBST ID='NUOVO MATTONE', XB=0.9,1.5,0.0,1.2,1.0,1.5, SURF_ID='POLYPROPYLENE',  
HT3D=T/  
  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,-0.2,0.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,0.3,0.8,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh03 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh03 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.4,1.7,0.8,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh04 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.2,1.4,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh04 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=1.2,1.4,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh04 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.2,1.4,-0.2,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.7,1.9,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=1.7,1.9,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.7,1.9,-0.2,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,0.8,-0.2,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,1.2,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,1.2,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh05 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,1.2,-0.2,1.3,2.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=2.3,2.3,-0.2,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.9,2.3,1.3,1.3,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=1.9,2.3,-0.2,-0.2,0.0,2.0/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh07 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.9,2.3,-0.2,1.3,2.0,2.0/  
  
&BNDF QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE'/  
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/  
  
&TAIL /
```

## BIBLIOGRAFIA

- Aboulkas, A., el harfi, K., & el Bouadili, A. (2010). Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1363–1369.
- Amico, A., Bellomia, G., & Bellomia, G. (2011). *FIRE SAFETY ENGINEERING* (C. Olivero, Ed.; Vol. 1). Stamperia Artistica Nazionale.
- Andersson, B. (2011). *Computational fluid dynamics for engineers*. Cambridge University Press.
- Green, D. W., Perry, R., & Southard, M. Z. (2019). *Perry's Chemical Engineer's Handbook* (Mc Graw Hill Education, Ed.; 9th ed.).
- Huang, J., He, C., Tong, H., & Pan, G. (2017). Studies on thermal decomposition behaviors of polypropylene using molecular dynamics simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 94(1).
- Hurley, M. J. (n.d.). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Editor-in-Chief Fifth Edition*.
- Ingason, H., Li, Y. Z., & Lönnemark, A. (2015). Tunnel fire dynamics. In *Tunnel Fire Dynamics*. Springer New York.
- la Malfa, A., & la Malfa, S. (2009). *PREVENZIONE INCENDI - Approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio* (Legislazione Tecnica s.r.l, Ed.; Settima).
- Livkiss, K., Husted, B. P., Beji, T., & van Hees, P. (2019). Numerical study of a fire-driven flow in a narrow cavity. *Fire Safety Journal*, 108.
- Mauro Malizia, I. (n.d.). *Codice di prevenzione incendi*.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., & Vanella, M. (2022). *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide* (Sixth Edition, Vol. 1). NIST Special Publication 1018-1.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., & Vanella Marcos. (2022). *Fire Dynamics Simulator User's Guide* (Sixth). NIST special Publication 1019.
- NFPA 921 Guide for Fire and Explosion Investigations* . (2001).
- Society of Fire Protection Engineering. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (M. J. Hurley, Ed.; 5th ed.).

Stauffer, E., Dolan, J. A., & Newman, R. (2008). *Chemistry and Physics of Fire and Liquid Fuels*.

## **RINGRAZIAMENTI**

Arrivata al termine di questo lavoro di tesi vorrei spendere qualche parola per ringraziare chi ha contribuito alla sua realizzazione.

Un ringraziamento sincero è rivolto al mio relatore l'Ing. Giordano Emrys Scarponi per la sua grande disponibilità, per la pazienza e professionalità con cui nell'arco di questi mesi mi ha accompagnato all'interno del mondo della modellazione, con le tante videochiamate, e per il sostegno che mi ha fornito anche quando nulla sembrava dare i risultati sperati.

Ringrazio il mio correlatore l'Ing. Matteo Pugnalin per avermi accolto all'interno della società Guidi & Partners dandomi l'opportunità di svolgere il tirocinio in un ambiente sereno e familiare. Ringrazio i miei colleghi d'ufficio Ivan e Linda per avermi supportato e ascoltato quando avevo bisogno di un consiglio e permesso di utilizzare il loro caro "Richard" per le tante simulazioni. Ringrazio anche tutto lo studio per l'accoglienza ricevuta.