

**POLITECNICO DI TORINO**

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Chimica e dei Processi Sostenibili**

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio dei fenomeni di incendio in ambiente  
confinato tramite i software di simulazione  
CFAST e PHAST**



**Relatori**

prof. Marmo Luca

prof. Carpignano Andrea

ing. Basso Barbara

**Candidato**

Manuguerra Federica

Marzo 2025

*A mia sorella*

# Indice

<b>1. Introduzione</b> .....	1
<b>2. Metodi e strumenti per lo studio dei fenomeni di incendio</b> .....	6
2.1 Software di simulazione .....	8
2.1.1 PHAST .....	8
2.1.2 CFAST.....	9
2.2 Metodo ad indici di cui al DPCM 27/08/2021.....	12
2.3 Considerazione conclusive .....	13
<b>3. Analisi storica dei casi di incendi occorsi in Piemonte</b> .....	17
3.1 Studio del database di Arpa Piemonte: analisi dei dati.....	17
3.2 Approfondimenti su alcuni incendi occorsi .....	23
3.3 Considerazioni conclusive .....	24
<b>4. Applicazione di metodi e strumenti a casi studio di incendi in ambienti confinati</b> ...	27
4.1 Incendio di magazzino contenente pneumatici.....	28
4.1.1 Simulazione mediante PHAST .....	28
4.1.2 Modellazione dell'incendio mediante CFAST.....	31
4.1.3 Applicazione del Metodo ad indici (DPCM 27/08/2021) .....	35
4.1.4 Analisi dei risultati .....	38
4.2 Incendio di magazzino contenente materiali in PVC .....	39
4.2.1 Simulazione mediante PHAST .....	39
4.2.2 Modellazione dell'incendio mediante CFAST.....	42
4.2.3 Applicazione del Metodo ad indici (DPCM 27/08/2021) .....	46
4.2.4 Analisi dei risultati .....	48
4.3 Incendio di magazzino contenente materiali in cartone .....	48
4.3.1 Simulazione mediante PHAST .....	48
4.3.2 Modellazione dell'incendio mediante CFAST.....	51
4.3.3 Applicazione del Metodo ad indici (DPCM 27/08/2021) .....	55
4.3.4 Analisi dei risultati .....	56
<b>5. Conclusioni</b> .....	58
<b>6. Figure</b> .....	61
<b>7. Tabelle</b> .....	63
<b>8. Equazioni</b> .....	64

<b>9. Bibliografia .....</b>	<b>65</b>
<b>10. Ringraziamenti .....</b>	<b>67</b>



# 1. Introduzione

Negli ultimi decenni, gli incendi di origine antropica, spesso connessi ad attività industriali e produttive, hanno suscitato un crescente interesse per le loro implicazioni sulla sicurezza ambientale e sulla salute pubblica; in particolare, gli incendi che si verificano all'interno di impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti costituiscono un elemento di criticità, con potenziali ripercussioni sulle infrastrutture, sull'ambiente e sul benessere della popolazione.

Per affrontare efficacemente questi eventi, è importante adottare metodologie di analisi avanzate in grado di fornire una comprensione approfondita della dinamica degli incendi e dei processi di dispersione degli inquinanti aerodispersi, in particolare dei fumi tossici di combustione.

Numerosi studi di letteratura scientifica hanno evidenziato l'impatto degli incendi, mettendo in luce i potenziali rischi per l'ambiente e per la salute umana; ad esempio, Marino et al. (2021) hanno analizzato il rilascio di fumi tossici in caso di combustione di materiali riciclati, come rifiuti industriali e pneumatici, dimostrando che la presenza di materiali inerti influisce significativamente sulla quantità di sostanze nocive emesse. Un ulteriore contributo è quello riportato nello studio di Bertolini e Gallo (2020), che fornisce una panoramica delle metodologie utilizzate per lo studio della dispersione degli inquinanti atmosferici, con particolare attenzione agli incendi industriali.

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno di un progetto più ampio nato dalla collaborazione tra l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte (Arpa Piemonte) e il Politecnico di Torino, finalizzato ad approfondire lo studio dei fenomeni di incendio di origine antropica provenienti da attività produttive, utilizzando metodologie di modellistica specialistica.

Arpa Piemonte, istituita dalla Legge Regionale n. 60 del 13 aprile 1995, successivamente sostituita dalla Legge Regionale n. 18 del 26 settembre 2016, "*svolge le attività di controllo, di supporto e di consulenza tecnico-scientifica e le altre funzioni ad essa attribuite dalla normativa vigente, fornendo supporto alla Regione, agli enti locali, anche in forma associata, e alle aziende sanitarie*" (Regione Piemonte, 2016); oltre a tali attività ordinarie, svolge anche un ruolo fondamentale al verificarsi di situazioni di emergenza di origine sia antropica che naturale, tramite il suo servizio di pronta disponibilità, effettuando attività di campionamento delle varie matrici ambientali (aria, acqua, suolo).

Il presente progetto ha avuto inizio nei primi mesi del 2022, nell'ambito del mio tirocinio curriculare presso l'Agenzia; in questa fase preliminare, è stata condotta un'analisi dei dati relativi agli incendi occorsi in Piemonte, con particolare attenzione a quelli verificatisi negli impianti di stoccaggio e trattamento dei rifiuti, anche in relazione all'emanazione delle Linee guida per la predisposizione del Piano di Emergenza Esterna e per la relativa informazione della popolazione, di cui al DPCM del 27 agosto 2021 (Presidenza del Consiglio dei Ministri, 2021). Tale DPCM propone l'adozione di un metodo speditivo, basato su indici per la valutazione del rischio e la definizione delle aree di pianificazione relative a tali impianti, in sostituzione di valutazioni specialistiche quantitative delle conseguenze di un incendio di rifiuti.

L'obiettivo iniziale del presente progetto di tesi era quello di validare la stima delle aree di pianificazione determinate con il sopraccitato Metodo ad Indici, attraverso l'utilizzo di software specialistici, in particolare il PHAST, messo a disposizione da Arpa, per lo studio della dispersione dei fumi tossici derivanti dagli incendi realmente occorsi negli impianti di

stoccaggio e trattamento rifiuti. L'intento era quello di proseguire e ampliare un precedente lavoro di tesi magistrale in Ingegneria Chimica presso il Politecnico di Torino (Puliga, 2022), che aveva approfondito il termine sorgente degli incendi di rifiuti solidi all'aperto, considerando parametri come la potenza termica emessa, la temperatura media dei fumi e l'altezza delle fiamme, focalizzandosi sulla fase di pieno sviluppo dell'incendio ed escludendo invece le fasi di ignizione, propagazione, esaurimento e le operazioni di spegnimento.

Per le finalità del presente progetto sono state analizzate le relazioni tecniche predisposte da Arpa Piemonte nell'ambito degli interventi in emergenza a seguito di alcuni incendi occorsi negli impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti; tali relazioni contengono informazioni sulle modalità di campionamento e sulle concentrazioni di inquinanti rilevate, ma non riportano i dati utili ai fini del progetto, consistenti nei dati di input necessari per condurre le simulazioni di tali eventi mediante software modellistici, quali ad esempio le formule chimiche e le quantità dei materiali coinvolti nell'incendio, nonché le dimensioni delle strutture interessate.

Alla luce di quanto sopra, per proseguire lo studio modellistico dei fenomeni di incendio, si è deciso di focalizzare il presente lavoro di tesi su un diverso ambito, riguardante gli incendi in ambienti chiusi, e in particolare nei magazzini di stoccaggio di materiali, prendendo spunto da alcune valutazioni riportate nelle analisi del rischio di incidente rilevante degli stabilimenti soggetti alla normativa "Seveso".

Tale approfondimento è risultato, infatti, di interesse, per Arpa, in quanto tali eventi costituiscono una ricorrenza nell'ambito dell'analisi storica degli incendi occorsi in Piemonte. Preliminarmente allo studio modellistico è stata infatti esaminata l'applicativo "Controlli Non Programmati" (CNP) utilizzato dall'Agenzia per la raccolta dei dati sugli interventi in pronta disponibilità per la gestione delle emergenze ambientali, che Arpa svolge nell'ambito delle proprie attività istituzionali; esaminando il periodo compreso tra marzo 2014 e ottobre 2024, si è riscontrato che tra i circa 360 casi di incendi il 10% riguardava i magazzini di stoccaggio.

Considerata la natura eterogenea dei rifiuti solidi combustibili, che possono essere costituiti da diversi materiali (quali ad esempio carta, cartone, plastica, apparecchiature elettriche ed elettroniche ed ingombranti), peraltro non sempre nota al momento del verificarsi degli incendi, i campionamenti condotti da Arpa Piemonte sulla matrice aria riguardano inizialmente i prodotti di combustione più diffusi che si generano in questi eventi, quali ad esempio monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NOx), particolato fine (PM2.5 e PM10) e composti organici volatili (COV). Queste sostanze campionate, pur essendo in gran parte simili a quelle rilevate in altri contesti di incendio, presentano alcune peculiarità legate alla natura specifica degli incendi di rifiuti.

Si è quindi proseguito lo studio della modellistica approfondendo gli scenari di incendio di determinati materiali stoccati in magazzini mediante l'utilizzo combinato di due software modellistici (PHAST e CFAST), per simulare le diverse fasi dell'incendio. Parallelamente, come ulteriore strumento di valutazione, è stato applicato il Metodo ad Indici, di cui al DPCM del 27 agosto 2021, al fine di verificare l'attendibilità dei risultati di tale metodologia e permettere una validazione incrociata dei risultati ottenuti.

Per delineare in modo chiaro il percorso metodologico adottato e i principali temi affrontati nel presente elaborato, si fornisce di seguito una panoramica della struttura del documento, suddivisa per capitoli.

Il secondo capitolo dedicato alla descrizione delle metodologie impiegate per l'analisi degli incendi, anche approfondendo la teoria proposta dal Quintiere (1998), sviluppata nel successivo capitolo 4, con particolare attenzione agli strumenti di simulazione adottati per lo studio della

dinamica degli eventi di incendio e della dispersione degli inquinanti atmosferici e ai dati di input e output necessari:

- PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool): tramite il modulo “Warehouse” per descrivere i potenziali scenari di incidenti, come fuoriuscite, esplosioni o incendi, che potrebbero verificarsi in un magazzino contenente sostanze pericolose. In particolare, l’analisi si è concentrata sulla dispersione dei prodotti della combustione nell’ambiente circostante, attraverso l’elaborazione di dati di output quali la massa di inquinanti emessi (CO, CO<sub>2</sub> e altri composti tossici), la loro dispersione nello spazio e nel tempo, tenendo conto delle diverse classi di stabilità atmosferica e della temperatura (DNV, 2025);
- CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport): questo software è stato impiegato per lo studio della combustione in ambienti confinati, con un focus specifico sull’evoluzione dell’incendio all’interno del magazzino. Il modello ha permesso di analizzare alcuni parametri quali la portata massica dei fumi e dei prodotti di pirolisi generati durante la combustione, nonché la potenza rilasciata (Heat Release Rate - HRR) (NIST, 2023);
- Metodo ad Indici, di cui al DPCM del 27 agosto 2021: oltre ai software di simulazione, è stato applicato tale metodo semplificato per la valutazione del rischio negli stabilimenti di stoccaggio e trattamento rifiuti, basato sull’assegnazione di punteggi a parametri predefiniti.

Il terzo capitolo è articolato in due sezioni, ognuna delle quali affronta un aspetto importante per comprendere il contesto operativo e il supporto che Arpa Piemonte fornisce per monitorare e gestire le emergenze in caso di scenari di incendi:

- analisi dell'applicativo CNP interno all'Agenzia: la prima sezione è dedicata all’analisi approfondita dello strumento informatico utilizzato da Arpa Piemonte nell’ambito del servizio di pronta disponibilità per le emergenze ambientali. In particolare, è stato esaminato il sistema di raccolta e gestione delle segnalazioni relative agli incendi che si sono verificati nel territorio piemontese;
- analisi delle relazioni sugli incendi negli impianti di gestione rifiuti: la seconda sezione si focalizza sull’esame di quattro relazioni redatte da Arpa Piemonte, riguardanti incendi verificatisi in impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti situati nei quattro dipartimenti territoriali (Nord-Ovest, Nord-Est, Sud-Est e Sud-Ovest) dell’Agenzia.

Il capitolo conclusivo si focalizza sull’analisi approfondita del fenomeno di combustione, inteso come un insieme di reazioni chimiche esotermiche che avvengono in presenza di ossigeno, rilasciando calore, fumi, prodotti di pirolisi e gas di combustione, i quali influenzano significativamente l’evoluzione e la propagazione dell’incendio. L’analisi si è concentrata sulla dinamica della combustione che è risultata essere fortemente dipendente da vari fattori, tra cui la natura chimico-fisica del materiale coinvolto, le condizioni ambientali e le caratteristiche specifiche del focolaio, che influenzano parametri fondamentali come la velocità di propagazione, l’intensità termica e la durata complessiva dell’evento incendiario.

Al fine di modellare l’evoluzione dell’incendio in un contesto ingegneristico, sono stati utilizzati due strumenti di simulazione avanzati, CFAST e PHAST, precedentemente introdotti nel secondo capitolo. Questi software sono stati impiegati per simulare due scenari distinti: il primo relativo allo sviluppo di un incendio all’interno di un magazzino e il secondo inerente alla dispersione dei prodotti della combustione nell’ambiente esterno. Le simulazioni sono state condotte considerando tre tipologie di materiali (pneumatici, PVC e cartone), ciascuno caratterizzato da specifiche proprietà termochimiche che influenzano i meccanismi di

combustione, le emissioni inquinanti e le modalità di propagazione dell'incendio in un ambiente confinato.

Per concludere il presente lavoro di tesi e collegarlo all'obiettivo originario del progetto, si è pensato di assimilare i sopracitati materiali a dei rifiuti, ipotizzandoli come materiali esausti, e pertanto è stato applicato il Metodo ad Indici, di cui al DPCM del 27 agosto 2021, al fine di verificare se la stima delle aree di pianificazione così ottenute potevano essere confrontate con gli esiti delle simulazioni numeriche ottenute tramite i software PHAST e CFAST.



## 2. Metodi e strumenti per lo studio dei fenomeni di incendio

Prima di analizzare nel dettaglio le metodologie adottate nel presente studio, è importante fornire un inquadramento generale del fenomeno degli incendi, così da poter analizzare correttamente le sue dinamiche e identificare i parametri chiave necessari per la sua modellazione. Tra i testi principali di riferimento si cita il *Principles of Fire Behavior* di J. Quintiere (1998) che definisce la combustione come “una reazione esotermica tra un combustibile e un ossidante, nella quale il rilascio di energia sotto forma di calore è il principale motore del processo di propagazione dell’incendio”. Un incendio, dunque, rappresenta un processo termochimico complesso che si sviluppa attraverso una reazione di ossidazione rapida, generalmente in presenza di ossigeno atmosferico, portando all’emissione di calore e gas, tra cui composti potenzialmente tossici, i quali possono costituire un significativo rischio per la salute e l’ambiente, in funzione della natura del materiale combustibile e delle condizioni della combustione.

L’evoluzione di un incendio si articola in quattro fasi principali: ignizione, crescita, flashover e decadimento, le quali possono essere influenzate da variabili ambientali e parametri del sistema, come la temperatura, la disponibilità di ossigeno e la natura del materiale combustibile.

La fase iniziale è rappresentata dall’ignizione in cui il combustibile, raggiungendo una temperatura critica, subisce il processo di pirolisi, ovvero una decomposizione termica che porta alla formazione di composti più semplici e alla liberazione di gas combustibili. Questo innesco può avvenire spontaneamente o essere determinato da una fonte di calore esterna, ma in entrambi i casi risulta determinante nella successiva evoluzione dell’incendio. I principali prodotti della pirolisi comprendono gas altamente reattivi, come idrogeno ( $H_2$ ), monossido di carbonio (CO) e idrocarburi volatili, i quali, una volta liberati, possono combinarsi con l’ossigeno atmosferico e partecipare attivamente alla reazione di combustione, contribuendo così all’intensificazione del fenomeno (Babrauskas, 2003).

Durante la fase di crescita, il calore liberato dalla combustione accelera ulteriormente la pirolisi dei materiali combustibili, incrementando la produzione di gas infiammabili e intensificando così la reazione di combustione. L’aumento del rilascio di calore favorisce la continua propagazione del fuoco. Se le condizioni ambientali, come la ventilazione e il carico di incendio, lo permettono, si può verificare il fenomeno del *flashover*, un’improvvisa transizione che porta a un’esplosiva accelerazione della temperatura e a una propagazione incontrollata delle fiamme nell’ambiente circostante. Durante questa fase, le temperature possono superare i  $1000^{\circ}C$ , con l’incendio che raggiunge il suo picco di intensità.

Segue quindi la fase di combustione attiva e propagazione dell’incendio, in cui i gas combustibili generati dalla pirolisi del materiale reagiscono con l’ossigeno atmosferico, dando luogo alla formazione di anidride carbonica ( $CO_2$ ), vapore acqueo ( $H_2O$ ) e altri prodotti. Il calore rilasciato dalla reazione di combustione permette la propagazione dell’incendio ad altre aree. Allo stesso tempo, mantiene costante la produzione di gas infiammabili e particelle che alimentano il proseguimento del processo incendiario (Quintiere, 1998).

Parallelamente al processo di combustione attiva, si verificano anche reazioni secondarie che conducono alla formazione di ossidi di azoto ( $NO_x$ ) e particolato, che sono i principali responsabili della produzione di fumi e dell’inquinamento atmosferico associato agli incendi. Come sottolineato da Babrauskas (2003), “*gli incendi rappresentano una delle principali fonti di inquinamento da particolato fine, con emissioni che dipendono strettamente dalla*

*composizione chimica del materiale combustibile e dalle condizioni di combustione*”, evidenziando così l’importanza di comprendere le caratteristiche del materiale e le variabili ambientali per prevedere e controllare le emissioni di particolato e la composizione dei fumi tossici prodotti dalla combustione.

Infine, l’ultima fase è quella del decadimento, che si verifica quando la disponibilità di combustibile o ossigeno inizia a ridursi progressivamente, provocando la diminuzione dell’intensità delle fiamme e il raffreddamento dell’ambiente circostante. Nonostante in questa fase l’incendio appaia in fase di attenuazione, possono persistere zone di materiale incandescente che continuano a bruciare in modo lento e localizzato (Drysdale, 2011).

L’analisi e la modellizzazione del comportamento degli incendi richiedono una valutazione approfondita non solo della velocità e dell’intensità della combustione, ma anche della geometria dell’ambiente in cui si sviluppa l’incendio poiché questi fattori interagiscono tra loro, influenzando l’evoluzione del fenomeno. Ciò viene sottolineato da Quintiere (1998) in cui si legge che *“la propagazione dell’incendio è influenzata da numerosi fattori, tra cui la composizione chimica del combustibile, la temperatura, la concentrazione di ossigeno e le caratteristiche dell’ambiente, come la ventilazione e la disposizione del materiale”*, evidenziando l’importanza di comprendere come ciascuno di questi elementi contribuisca alla dinamica dell’incendio.

Dopo aver fornito un inquadramento qualitativo del fenomeno degli incendi, risulta evidente che una determinazione accurata dei parametri che influenzano la combustione dipende da numerosi fattori ambientali e fisico-chimici, i quali devono essere attentamente considerati in fase di modellizzazione al fine di ottenere risultati affidabili e rappresentativi del fenomeno reale.

Tra i principali fattori che influenzano la modellizzazione degli incendi, temperatura e umidità giocano un ruolo importante, poiché incidono direttamente sulle proprietà del combustibile e sulle dinamiche di scambio termico nell’ambiente interessato (Quintiere, 1998). La temperatura, infatti, regola la rapidità con cui i materiali raggiungono il punto di innesco e favorisce il rilascio di gas infiammabili, mentre l’umidità influisce sulla quantità di energia necessaria per avviare e sostenere la combustione, rallentando la propagazione dell’incendio nei materiali più umidi. Un altro fattore importante è la natura del combustibile coinvolto, le cui caratteristiche chimico-fisiche determinano sia la velocità che l’intensità della combustione, influenzando non solo la quantità di calore rilasciato, ma anche la produzione di fumi e gas tossici (Babrauskas, 2003). Accanto a questi fattori, per gli incendi in spazi aperti svolgono un ruolo rilevante anche le condizioni meteorologiche, incidendo sulla velocità di propagazione delle fiamme e sull’estensione complessiva dell’incendio. Alla luce di ciò, è evidente che la combinazione di questi fattori rende complessa la previsione del comportamento degli incendi, richiedendo l’impiego di modelli matematici e simulazioni avanzate per stimarne l’evoluzione nel tempo e nello spazio.

Nel contesto specifico di questa tesi, l’applicazione dei modelli di simulazione per lo studio degli incendi negli impianti di trattamento e stoccaggio dei rifiuti risulta particolarmente complessa a causa della difficoltà di determinare con precisione la composizione chimico-fisica dei materiali coinvolti, data la natura eterogenea dei rifiuti, oltre che dalle variabili legate alle modalità di gestione e stoccaggio.

Pertanto, nel prosieguo di questo capitolo, si è valutata la possibilità di applicare, attraverso alcune semplificazioni, tra cui in primis lo studio degli incendi in spazi confinati, modelli di simulazione degli incendi originariamente sviluppati per altri contesti, in quanto attualmente non esistono strumenti specifici per la modellizzazione degli incendi di rifiuti. A tal fine, è stata analizzata l’applicabilità di tali modelli attraverso lo studio dei dati di input e dei risultati

prodotti; in particolare, sono stati esaminati la sezione “Warehouse” del software PHAST e il software CFAST, entrambi specificamente progettati per studiare incendi in ambienti chiusi, oltre al Metodo ad Indici, di cui al DPCM del 27/08/2021, che propone un approccio semplificato per stimare le aree di pianificazione degli impianti di gestione dei rifiuti.

## 2.1 Software di simulazione

Nell’ambito della modellizzazione degli incendi sono disponibili diversi modelli di calcolo per analizzarne l’evoluzione e prevedere la dispersione dei prodotti della combustione. Questi modelli possono essere distinti in base al livello di complessità e alla precisione con cui descrivono i fenomeni coinvolti. I principali modelli sono:

- Modelli analitici: basati su equazioni semplificate che descrivono i fenomeni fisici fondamentali, come la termodinamica e la cinetica della combustione; essi forniscono soluzioni rapide e approssimative, utili per stime preliminari ma limitate nella rappresentazione di effetti complessi come la turbolenza e le interazioni ambientali (Quintiere, 1998);
- Modelli numerici parametrici: integrano relazioni analitiche in simulazioni numeriche, consentendo l’analisi dell’evoluzione dell’incendio in funzione di parametri variabili, come il tipo di combustibile, la ventilazione e la geometria dell’ambiente. Questi modelli offrono maggiore flessibilità rispetto ai modelli analitici, pur mantenendo una certa approssimazione nella descrizione dei fenomeni fisici (Heskestad, 2002);
- Modelli numerici accurati (o modelli CFD - Computational Fluid Dynamics): risolvono equazioni differenziali che descrivono la conservazione della massa, della quantità di moto e dell’energia, consentendo una simulazione dettagliata della propagazione del calore, della dispersione dei fumi e delle interazioni tra l’incendio e la geometria del contesto. Questi modelli forniscono previsioni accurate per scenari complessi, ma richiedono un’elevata capacità computazionale e tempi di calcolo significativi (Mowrer & Kuligowski, 2007; Cox, 2005).

Ai fini del presente studio, sono stati utilizzati il software PHAST, classificabile tra i modelli numerici parametrici, e il software CFAST, appartenente alla categoria dei modelli numerici accurati. Di seguito, vengono riportate le informazioni relative ai suddetti software, desunte dai rispettivi manuali d’uso.

### 2.1.1 PHAST

PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) è un software avanzato sviluppato da Det Norske Veritas (DNV) per l’analisi delle conseguenze di scenari incidentali in diversi settori industriali, tra cui il petrolchimico e la sicurezza industriale. Questo strumento consente di modellare diversi eventi incidentali, come il rilascio e la dispersione di sostanze pericolose, incendi, esplosioni ed effetti tossici (DNV, 2025).

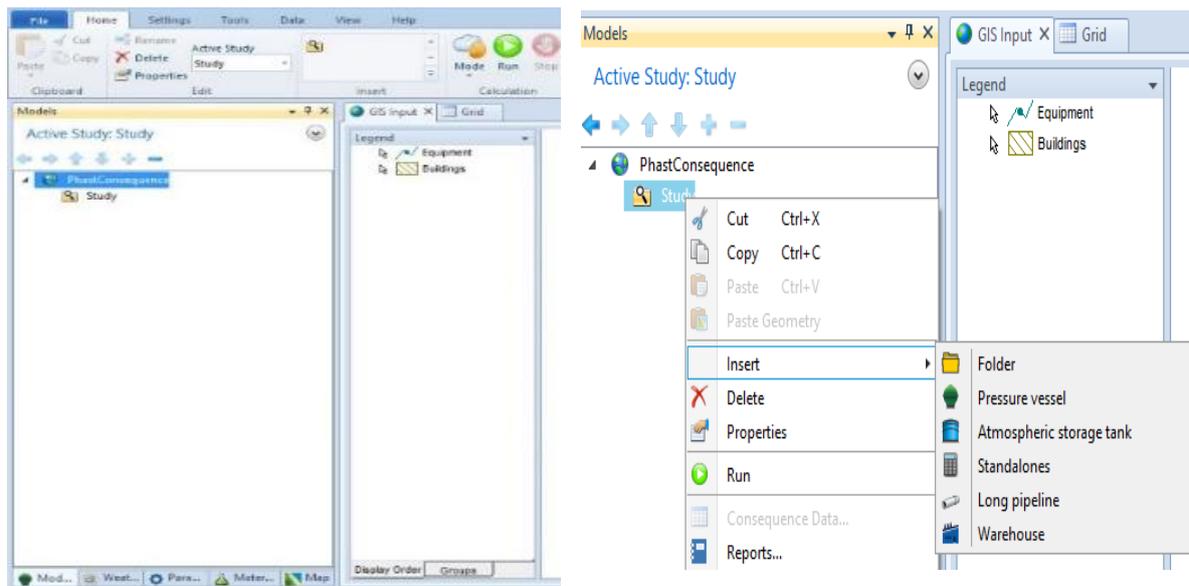
Nell’ambito del presente lavoro di tesi si è approfondita la sezione "Warehouse" presente all’interno del suddetto software, progettata per simulare il comportamento di un incendio in ambienti confinati, come magazzini e depositi. I parametri di input richiesti dal software, al fine di ottenere simulazioni accurate, sono:

- le informazioni geometriche relative alla struttura, alle aperture, alla presenza dei sistemi antincendio e alla configurazione delle porte (manuali o automatiche). Questi dati

influiscono sulla capacità di contenimento del calore e dei fumi durante un incendio e sono necessari per determinare il volume di aria disponibile per la ventilazione e la diffusione dei fumi;

- La caratterizzazione delle sostanze immagazzinate tramite l'inserimento della formula chimica bruta, specificando i principali componenti chimici, come carbonio, ossigeno, zolfo, fosforo, idrogeno, azoto e altri elementi rilevanti, oltre alla quantità e alla percentuale di materiale stoccato che partecipa alla combustione.

Inoltre, nel software è possibile modificare i dati predefiniti riguardanti la letalità della sostanza, la dispersione, il rischio di incendio e di esplosione, fornendo così una personalizzazione più dettagliata della simulazione.



**Figura 2.1.** Schermate di input del software PHAST.

Una volta che questi parametri sono stati inseriti nel software, PHAST è in grado di generare output dettagliati che simulano la propagazione dell'incendio e i suoi effetti, tra cui:

- Curve di radiazione termica e curve di sovrappressione;
- Composizione chimica dei prodotti di combustione espressa in moli;
- Curve di concentrazione nel tempo e nello spazio che mostrano la dispersione delle sostanze pericolose, come fumi e altri prodotti della combustione, all'esterno della struttura;
- Curve di dose e probabilità di letalità.

### 2.1.2 CFAST

CFAST (Consolidated Fire and Smoke Transport Model) è un modello di simulazione sviluppato dal National Institute of Standards and Technology (NIST), progettato per analizzare l'evoluzione degli incendi in ambienti confinati con geometrie semplici, come locali rettangolari o quadrati. Utilizzando un approccio a zone, il modello suddivide ogni compartimento in due strati (superiore e inferiore), permettendo di modellare il trasporto di fumi, gas di combustione e la distribuzione della temperatura all'interno di spazi chiusi (NIST, 2023).

Anche in questo caso, i dati di input riguardano la struttura e il contenuto, in particolare le:

- Caratteristiche del materiale stoccato (massa, formula bruta e potere calorifico inferiore);
- Caratteristiche dell'edificio (dimensioni, materiale costruzione, aperture e sistemi di ventilazione e sistemi antincendio);
- Proprietà dell'incendio come il tempo e la potenza rilasciata (Heat Release Rate - HRR).

The figure displays two screenshots of the CFAST software input interface. The top screenshot shows the 'Compartment 1' configuration screen. It features a table with columns for ID, Num, Width, Depth, Height, X Position, Y Position, Z Position, Ceiling, Walls, Floor, F, H, V, M, D, T. Below the table are buttons for 'Add', 'Duplicate', 'Move Up', 'Move Down', and 'Remove'. The 'Geometry' section includes input fields for Width (X), Depth (Y), Height (Z), and Position (X, Y, Z). The 'Advanced' section includes 'Flow Characteristics' with radio buttons for 'Normal (Two-zone model)', 'Shaft (One-zone model)', and 'Corridor (Revised ceiling jet)', and a 'Variable Cross-sectional Area' table with 'Height' and 'Area' columns. The 'Materials' section includes a table for 'Ceiling Material', 'Ceiling Thickness', 'Wall Material', 'Wall Thickness', 'Floor Material', and 'Floor Thickness'. The bottom screenshot shows the 'Fires' configuration screen. It features a table with columns for Num, Compartment, Fire ID, Ignition by, Set Point, Target, X Position, Y Position, Fire Properties ID, Fuel, and Peak HRR. Below the table are buttons for 'Add New', 'Add F', 'From File', and 'Remove'. The 'Fire ID' section includes input fields for 'Fire ID', 'Compartment', 'Position X', 'Position Y', 'Ignition Criterion', 'Set Point', and 'Ignition Target'. The 'Fire Properties ID' section includes input fields for 'Fire Properties ID', 'C', 'N', 'H', 'O', 'Cl', 'Heat of Combustion', and 'Radiative Fraction'. A table for fire properties includes columns for 'Time', 'HRR', 'Height', 'Area', 'CO Yield', 'Soot Yield', 'HCN Yield', and 'TS Yield'.

**Figura 2.2.** Schermate di input del software CFAST.

Nel seguito si richiamano sinteticamente i principali parametri della teoria degli incendi del Quintiere (1998) che sono stati utilizzati per la caratterizzazione dei dati di input da inserire nel modello di simulazione CFAST.

Un parametro rilevante per comprendere la dinamica della combustione è la velocità di combustione ( $\dot{m}$ ), che misura la quantità di combustibile consumato per unità di tempo. Negli incendi su larga scala, il combustibile può vaporizzare (o pirolizzare) senza bruciare immediatamente, soprattutto se la quantità di ossigeno disponibile è limitata. Di conseguenza, è fondamentale distinguere tra la quantità di combustibile che vaporizza e quella che effettivamente reagisce con l'ossigeno nella fase attiva della combustione.

La velocità di combustione può variare in modo dinamico a causa di vari fattori ed è descritta dalla seguente formula:  $\dot{m} = \dot{m}'' \cdot A$  dove  $\dot{m}''$  risulta essere la velocità di combustione per unità di area e dipende dalle proprietà del combustibile (come la sua composizione e densità), mentre  $A$  rappresenta l'area coinvolta nella combustione.

Un altro aspetto fondamentale della combustione è il calore di combustione effettivo  $\Delta H_c$ , che rappresenta l'energia chimica liberata per unità di massa di combustibile vaporizzato che partecipa alla reazione. La potenza rilasciata ( $\dot{Q} = \text{HRR}$ ) è un parametro che misura l'energia rilasciata per unità di tempo durante la combustione. Questo indicatore è importante per valutare l'intensità e la crescita di un incendio, poiché riflette sia la quantità di energia generata sia la sua capacità di propagarsi all'interno dell'ambiente coinvolto. Tale parametro dipende dal flusso di massa di combustibile che brucia e dall'area di vaporizzazione del combustibile, e viene descritta dalla seguente relazione  $\dot{Q}_{\max} = \text{HRR}_{\max} = \dot{m}'' \cdot A \cdot \Delta H_c$ .

Nel Quintiere (1998) sono tabellati il valore massimo della velocità di combustione per unità di area  $\dot{m}''$  e calore di combustione effettivo  $\Delta H_c$ . Con questi valori, è quindi possibile calcolare il valore massimo della potenza di rilasciata  $\dot{Q}$ :

**Tabella 2.1.** Valori della velocità di combustione per unità di area e del calore di combustione effettivo (Quintiere, 1998).

**Table 6-2** Maximum burning flux values.

Fuel	$\dot{m}''$ (g/m <sup>2</sup> -s)
Liquified propane	100-130
Liquified natural gas	80-100
Benzene	90
Butane	80
Hexane	70-80
Xylene	70
JP-4	50-70
Heptane	65-75
Casoline	50-60
Acetone	40
Methanol	22
Polystyrene (granular)	38
Polymethyl methacrylate (granular)	28
Polyethylene (granular)	26
Polypropylene (granular)	24
Rigid polyurethane foam	22-25
Flexible polyurethane foam	21-27
Polyvinyl chloride (granular)	16
Corrugated paper cartons	14
Wood crib	11

Source: From Tewarson, Ref. 1.

**Table 6-3** Effective heat of combustion,  $\Delta H_c$  (kJ/g).

Methane	50.0
Ethane	47.5
Ethene	50.4
Propane	46.5
Carbon monoxide	10.1
n-Butane	45.7
c-Hexane	43.8
Heptane	44.6
Gasoline	43.7
Kerosene	43.2
Benzene	40.0
Acetone	30.8
Ethanol	26.8
Methanol	19.8
Polyethylene	43.3
Polypropylene	43.3
Polystyrene	39.8
Polycarbonate	29.7
Nylon 6/6	29.6
Polymethyl methacrylate	24.9
Polyvinyl chloride	16.4
Cellulose	16.1
Glucose	15.4
Wood	13-15

Source: Based on data from Tewarson, Ref. 1.

Ogni materiale o oggetto ha un tempo caratteristico di crescita, che rappresenta il tempo necessario affinché l'incendio raggiunga una potenza significativa. La potenza rilasciata (HRR) segue una relazione quadratica con il tempo, espressa dalla formula:

$$\dot{Q} = \text{HRR} = \alpha \cdot t^2 \quad (2.1)$$

dove  $\alpha$  è una costante che dipende dalle caratteristiche specifiche del combustibile e  $t$  è il tempo. I tempi di crescita dell'incendio sono classificati in quattro categorie principali, in base alla rapidità con cui si raggiunge una potenza di riferimento di 1 MW: lento (600 secondi), medio (300 secondi), veloce (150 secondi) e ultraveloce (75 secondi).

Da questa relazione è possibile calcolare  $\alpha$  considerando il tempo di crescita ipotetico dell'incendio e successivamente  $t_{\text{piccolo}}$  reale considerando quando viene raggiunta  $\text{HRR}_{\max}$  precedentemente calcolata. Questa relazione quadratica è utile per descrivere la fase di crescita dell'incendio fino al suo pieno sviluppo, cioè quando raggiunge la fase stazionaria. Dopo tale

fase la combustione è limitata dall'esaurimento del materiale prodotto. Per calcolare il tempo nella fase stazionaria dell'incendio ( $t_{steady}$ ), viene determinata prima l'energia totale rilasciata ( $E_{tot}$ ), considerando la massa del materiale e il suo calore di combustione effettivo ( $\Delta H_c$ ), che viene poi divisa per l' $HRR_{max}$ .

Quando la portata di aria è limitata (ad esempio in un magazzino chiuso), anche la curva HRR risulta limitata. La portata massima di flusso d'aria ( $\dot{m}_{aria,max}$ ) attraverso un'apertura dipende dalla differenza di temperatura e dalla dimensione dell'apertura stessa. Per una ventilazione con altezza  $H_0$  e area di sezione trasversale  $A_0$ , la portata massima d'aria è espressa come:

$$\dot{m}_{aria,max} = 0.5 \cdot A_0 \cdot \sqrt{H_0} \quad (2.2)$$

In questo caso, la massima potenza di rilasciata all'interno della stanza è determinata dalla quantità di ossigeno disponibile, dato dalla seguente formula:

$$\dot{Q}_{max} = \dot{m}_{aria,max} \cdot 3000 \text{ kJ/kg}_{aria \text{ consumata}} \quad (2.3)$$

dove  $3000 \text{ kJ/kg}_{aria \text{ consumata}}$  è un valore costante utilizzato per quasi tutti i combustibili comuni.

Per calcolare l'energia ( $E_{steady, chiuso}$ ) totale rilasciata nel magazzino chiuso e quindi il tempo nella fase stazionaria ( $t_{steady, chiuso}$ ), è stata considerata la proporzione:

$$E_{steady, chiuso} : HRR_{max, chiuso} = E_{steady, aperto} : HRR_{max, aperto} \quad (2.4)$$

I parametri di output che si ottengono dal software CFAST sono i seguenti:

- la portata massica dei fumi emessi durante la combustione, dei singoli prodotti e la portata massica di pirolisi (la quantità di combustibile che subisce degradazione termica per unità di tempo) [kg/s];
- la potenza rilasciata (HRR), ovvero la potenza sviluppata dall'incendio in funzione del tempo [MW] (confrontato con l'HRR atteso);
- andamento della temperatura nel tempo;
- intensità di fiamma e altezza di fiamma.

## 2.2 Metodo ad indici di cui al DPCM 27/08/2021

A seguito dei numerosi episodi di incendi negli impianti di trattamento e stoccaggio rifiuti occorsi in Italia nell'ultimo decennio, è stata introdotta la Legge n. 132/2018 (Gazzetta Ufficiale, 2018), che ha imposto nuovi obblighi normativi per i gestori in merito alla redazione dei Piani di Emergenza Interni e per la predisposizione, da parte delle Prefetture, dei Piani di Emergenza Esterni, in analogia con quanto previsto per gli stabilimenti a rischio di incidenti rilevanti, secondo la normativa specifica da ultimo recepita in Italia con il D.Lgs. 105/2015 (Gazzetta Ufficiale, 2015). A seguito della Legge n. 132/2018 è stato sviluppato un Metodo ad indici, descritto nelle Linee Guida per la predisposizione del piano di emergenza esterna e per la relativa informazione della popolazione approvate con DPCM del 27/08/2021.

Tale metodo permette di ottenere una valutazione semi-quantitativa del rischio di incendio tramite l'assegnazione di punteggi specifici ai fattori di rischio e alle misure di prevenzione e protezione presenti nell'impianto che concorrono al calcolo dell'indice di rischio incendio (IR) secondo la formula:

$$IR = Pr + Pt - FC + FD \quad (2.5)$$

Dove:

- Pr = indice relativo allo stoccaggio dei rifiuti;
- Pt = indice relativo al trattamento dei rifiuti, si basa sulle lavorazioni e i processi nell'impianto;
- FC = fattore di credito che considera le misure di protezione adottate, come sistemi di spegnimento e barriere fisiche;
- FD = fattore di debito che valuta la pericolosità per la salute e l'ambiente, in relazione alla posizione dell'impianto rispetto alle aree sensibili.

Si precisa che l'indice Pr è determinato dal carico di incendio specifico ( $q_f$ ), il quale dipende a sua volta da vari fattori ed è stimata sommando il contributo delle diverse specie (i) presenti nel combustibile: la massa del materiale combustibile ( $g_i$ ), il suo potere calorifico ( $H_i$ ), la superficie dell'area operativa (A) e parametri che considerano, ad esempio, la partecipazione alla combustione ( $m_i$  e  $\Psi_i$ ), secondo la seguente formula:

$$q_f = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot H_i \cdot m_i \cdot \Psi_i}{A} \left[ \frac{MJ}{m^2} \right] \quad (2.6)$$

Il valore risultante dall'indice di rischio (IR) è successivamente associato a un livello qualitativo a cui è correlata una "distanza di attenzione", che rappresenta la distanza massima dal perimetro dell'impianto in cui si possono manifestare gli effetti di un incendio, come riportato in Tabella 2.

**Tabella 1.2.** Correlazione tra livello di rischio e distanza di attenzione (DPCM 27 agosto 2021).

Livello di rischio	Distanza di attenzione [m]	Distanza di attenzione per i Centri di raccolta (DM 8/4/2008 e ss.mm.ii.) [m]
Rischio Basso	100	50
Rischio Medio-Basso	200	100
Rischio Medio	300	150
Rischio Medio-Alto	400	200
Rischio Alto	500	250

Secondo le linee guida, in assenza di valutazioni tecniche specifiche più dettagliate, le distanze di attenzione valutate con questa metodologia possono essere prese a riferimento per la pianificazione dell'emergenza esterna.

### 2.3 Considerazione conclusive

Dopo aver analizzato in dettaglio i dati di input e output dei due software di modellizzazione e del metodo ad indici, vengono di seguito riportate alcune considerazioni sull'applicazione di tali strumenti nel contesto della gestione dei rifiuti, nonché osservazioni relative al metodo ad indici.

Come descritto al paragrafo 2.1.1, la sezione "Warehouse" del software PHAST consente di simulare in modo avanzato gli incendi, modellando con precisione il loro comportamento in ambienti confinati, come i magazzini di stoccaggio dei rifiuti; in particolare, permette di analizzare variabili, tra cui la distribuzione del calore, la propagazione dei fumi e la radiazione termica. Inoltre, tale sezione consente la valutazione dei rischi dei materiali stoccati, simulando la combustione dei rifiuti e analizzando i rischi legati alla produzione di fumi tossici.

Tuttavia, la precisione delle simulazioni dipende dalla qualità e completezza dei dati di input relativi ai rifiuti stoccati, che spesso sono difficili da reperire. Inoltre, tali simulazioni non sempre tengono conto di fattori reali, come le condizioni ambientali e la gestione della ventilazione, che possono influenzare significativamente l'evoluzione dell'incendio.

L'applicazione del software CFAST nel contesto dei rifiuti presenta numerosi vantaggi, ma anche alcune limitazioni. Come già sottolineato nel paragrafo 2.1.2, la sua principale utilità risiede nella capacità di simulare con accuratezza l'evoluzione di un incendio in ambienti confinati, modellando il trasporto di fumi e gas di combustione, la distribuzione della temperatura e la radiazione termica, permettendo così di valutare l'impatto dell'incendio sulle strutture.

Il modello a due zone impiegato da CFAST risulta particolarmente efficace per ambienti con geometrie semplici, come magazzini rettangolari o quadrati, tipici dei siti di stoccaggio dei rifiuti; tuttavia, in strutture più complesse, con compartimentazioni articolate o più livelli, questa schematizzazione potrebbe non rappresentare in modo realistico la distribuzione del calore e la propagazione dei fumi.

Un'ulteriore criticità riguarda la dipendenza della qualità delle simulazioni dalla precisione dei dati di input. La natura eterogenea dei rifiuti rende difficile una caratterizzazione accurata delle loro proprietà fisico-chimiche, compromettendo potenzialmente l'affidabilità dei risultati. Inoltre, il software non considera alcune variabili ambientali rilevanti, come le condizioni atmosferiche esterne o la ventilazione, che possono influenzare in modo significativo la propagazione dell'incendio.

Infine, CFAST è focalizzato sull'analisi dell'incendio in corso, ma non fornisce una valutazione degli effetti post-incendio, come la contaminazione dell'aria o del suolo, elementi fondamentali nello studio dei fenomeni di incendio e in particolare nel contesto dei rifiuti.

Il Metodo ad Indici, di cui al DPCM del 27/08/2021 rappresenta un approccio innovativo nella valutazione e gestione dei rischi legati agli impianti di gestione dei rifiuti. Uno dei principali vantaggi è la sua capacità di sintesi, che permette di ottenere una valutazione complessiva del rischio senza la necessità di analizzare ogni singolo parametro. Questa semplificazione permette anche una gestione più rapida ed efficiente delle emergenze, grazie alla valutazione automatizzata basata su dati predefiniti, riducendo così i tempi necessari per produrre report e adottare misure di sicurezza.

Nonostante ciò, tale metodo presenta alcune criticità, di cui la principale riguarda la semplificazione eccessiva dei fattori di rischio aggregando vari parametri in un unico valore numerico, creando così un'indicazione complessiva del rischio non in grado di rappresentare appieno la complessità e la specificità di ogni singolo impianto.

Un altro limite riguarda la difficoltà di considerare eventi imprevedibili o fattori esterni, come le condizioni meteorologiche estreme, che non sono inclusi nel calcolo dell'indice ma che potrebbero influire significativamente sull'evoluzione di un incidente. Infine, la determinazione e l'interpretazione degli indici potrebbero risultare complesse, in quanto ogni parametro riflette solo un aspetto parziale del rischio complessivo, e la sua valutazione può variare in base al contesto specifico.

Alla luce di quanto esposto, l'utilizzo dei software PHAST e CFAST per la modellizzazione degli incendi negli impianti di stoccaggio di rifiuti offre vantaggi significativi nella pianificazione delle emergenze. Tuttavia, la loro efficacia dipende in gran parte dalla qualità dei dati disponibili e dalla compatibilità con le caratteristiche geometriche e ambientali della struttura analizzata. Pertanto, per ottenere simulazioni più precise, è necessario introdurre alcune semplificazioni, in particolare riguardo alla tipologia dei materiali e alla loro struttura.

Parallelamente, sebbene il Metodo ad Indici offra vantaggi in termini di efficienza e standardizzazione, la sua applicazione richiede una gestione accurata dei dati e una continua revisione dei parametri utilizzati. Pur rappresentando un passo avanti nella semplificazione della valutazione dei rischi, è importante che venga integrato con altre analisi più dettagliate, quali ad esempio l'utilizzo di software modellistici, per garantire una valutazione completa e realistica dei rischi associati a tali contesti.



### 3. Analisi storica dei casi di incendi occorsi in Piemonte

Per comprendere in modo approfondito la fenomenologia degli incendi e analizzarne con maggiore accuratezza le sue dinamiche, il presente capitolo è strutturato in due fasi di studio interconnesse. Nella prima fase è stata condotta un'analisi storica dettagliata degli eventi di incendio verificatisi nel territorio piemontese, utilizzando i dati raccolti e archiviati nel database interno gestito da Arpa Piemonte; tale approccio, di particolare interesse per l'Agenzia, ha l'obiettivo di andare ad individuare eventuali ricorrenze e di effettuare un'analisi statistica dei casi registrati, fornendo così le basi per lo studio modellistico e il relativo approfondimento sullo studio sulle ricadute dei fumi tossici di combustione, trattato nel successivo capitolo 4.

Successivamente, l'attenzione si è focalizzata sull'analisi di quattro relazioni tecniche elaborate dal personale di Arpa, riguardanti incendi verificatisi negli ultimi anni presso impianti di trattamento e stoccaggio rifiuti, o in contesti analoghi, distribuiti nei Dipartimenti territoriali dell'Agenzia. L'obiettivo di questa seconda fase è stata quella di valutare se i dati contenuti nelle relazioni potessero costituire una base per l'elaborazione di modelli matematici e simulazioni numeriche, al fine di riprodurre con maggiore accuratezza il comportamento degli incendi in questi specifici contesti.

#### 3.1 Studio del database di Arpa Piemonte: analisi dei dati

Al fine di contestualizzare meglio l'utilizzo dell'applicativo interno utilizzato da Arpa Piemonte per la raccolta delle informazioni relative agli eventi incidentali occorsi nel territorio piemontese, è utile delineare le attività principali dell'Agenzia e la sua struttura organizzativa.

Come accennato nell'introduzione, Arpa Piemonte è l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte, istituita dalla Legge Regionale n. 60 del 13 aprile 1995, successivamente sostituita dalla Legge Regionale n. 18 del 26 settembre 2016. L'Agenzia *“svolge le attività di controllo, di supporto e di consulenza tecnico-scientifica e le altre funzioni ad essa attribuite dalla normativa vigente, fornendo supporto alla Regione, agli enti locali, anche in forma associata, e alle aziende sanitarie”* (Regione Piemonte, 2016); oltre a queste attività ordinarie, Arpa Piemonte svolge anche un ruolo fondamentale al verificarsi di situazioni di emergenza di origine sia antropica che naturale, tramite il suo servizio di pronta disponibilità, effettuando attività di campionamento delle varie matrici ambientali (aria, acqua, suolo).

L'Agenzia opera su tutto il territorio regionale e si suddivide in quattro Dipartimenti territoriali, ciascuno corrispondente a un quadrante specifico:

- Dipartimento territoriale del Piemonte Nord Ovest, che comprende la provincia di Torino;
- Dipartimento territoriale del Piemonte Sud Est, che si estende alle province di Alessandria e Asti;
- Dipartimento territoriale del Piemonte Sud Ovest, che copre la provincia di Cuneo;
- Dipartimento territoriale del Piemonte Nord Est, che comprende le province di Biella, Novara, Verbano Cusio Ossola e Vercelli.

Tale Dipartimenti sono dislocati sul territorio per ottimizzare le operazioni, pur seguendo linee organizzative comuni, condividendo informazioni e collaborando in modo sinergico per garantire una pianificazione e un'esecuzione efficace degli interventi. Infatti in caso di

emergenze ambientali, come previsto da Legge Regionale n. 18/2016, l’Agenzia gestisce un servizio di pronta disponibilità per gli interventi in emergenza sia di origine antropica che naturale e a tale scopo si è dotata di una specifica procedura tecnica identificata il codice U.RP.T170 (ARPA Piemonte, 2023). In particolare, durante gli incendi vengono effettuate analisi ambientali al fine di raccogliere dati su sostanze specifiche che fungono da "traccianti", come ad esempio, i prodotti della combustione come monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NOx), particolato fine (PM<sub>2.5</sub> e PM<sub>10</sub>) e composti organici volatili (COV). Questi parametri aiutano a identificare e caratterizzare gli incendi e valutarne l’impatto sull’ambiente e la salute pubblica.

Per gestire il servizio di pronta disponibilità in emergenza, dal 2014 è stato sviluppato internamente all’Agenzia l’applicativo “Controlli non programmati”, disponibile sulla intranet aziendale, che consente la registrazione delle segnalazioni provenienti da cittadini, operatori e altri Enti di soccorso relative alle diverse tipologie di inquinamenti (idrici, atmosferici e suolo), radiazioni ionizzanti, rumore, incendi, abbandono di rifiuti e spandimento di liquami, come illustrato nelle videate di seguito riportate:

**Figura 3.1.** Schermate applicativo interno di Arpa Piemonte “Controlli non programmati”.

Questo applicativo consente di generare un database che può essere utilizzato per analizzare gli andamenti degli eventi, rispondere in maniera uniforme alle emergenze e pianificare le azioni di intervento future legate agli eventi occorsi (es. indagini post incendio).

Nel presente progetto di tesi ci si è concentrati sulle segnalazioni relative ai casi di incendi avvenuti in Piemonte dal marzo 2014 ad ottobre 2024 per le quali è stata effettuata un’estrazione del database contenente un totale di 436 record registrati. Ogni record include una serie di informazioni, tra cui l’ID del report, la descrizione dell’evento, il dipartimento territoriale (Dipartimento Nord Ovest, Dipartimento Nord Est, Dipartimento Sud Ovest e Dipartimento Sud Est), la data e le modalità di segnalazione e l’Ente o la persona che l’ha effettuata (ad esempio i Vigili del Fuoco, il servizio di emergenza 118, il privato cittadino, ecc.).

Per le esigenze specifiche del lavoro, i dati estratti dal database sono stati rimaneggiati al fine di facilitarne l’elaborazione e l’analisi mantenendo le colonne ID del report, Dipartimento e data di segnalazione a cui sono stati aggiunti nuovi campi includendo il tipo di attività in cui è

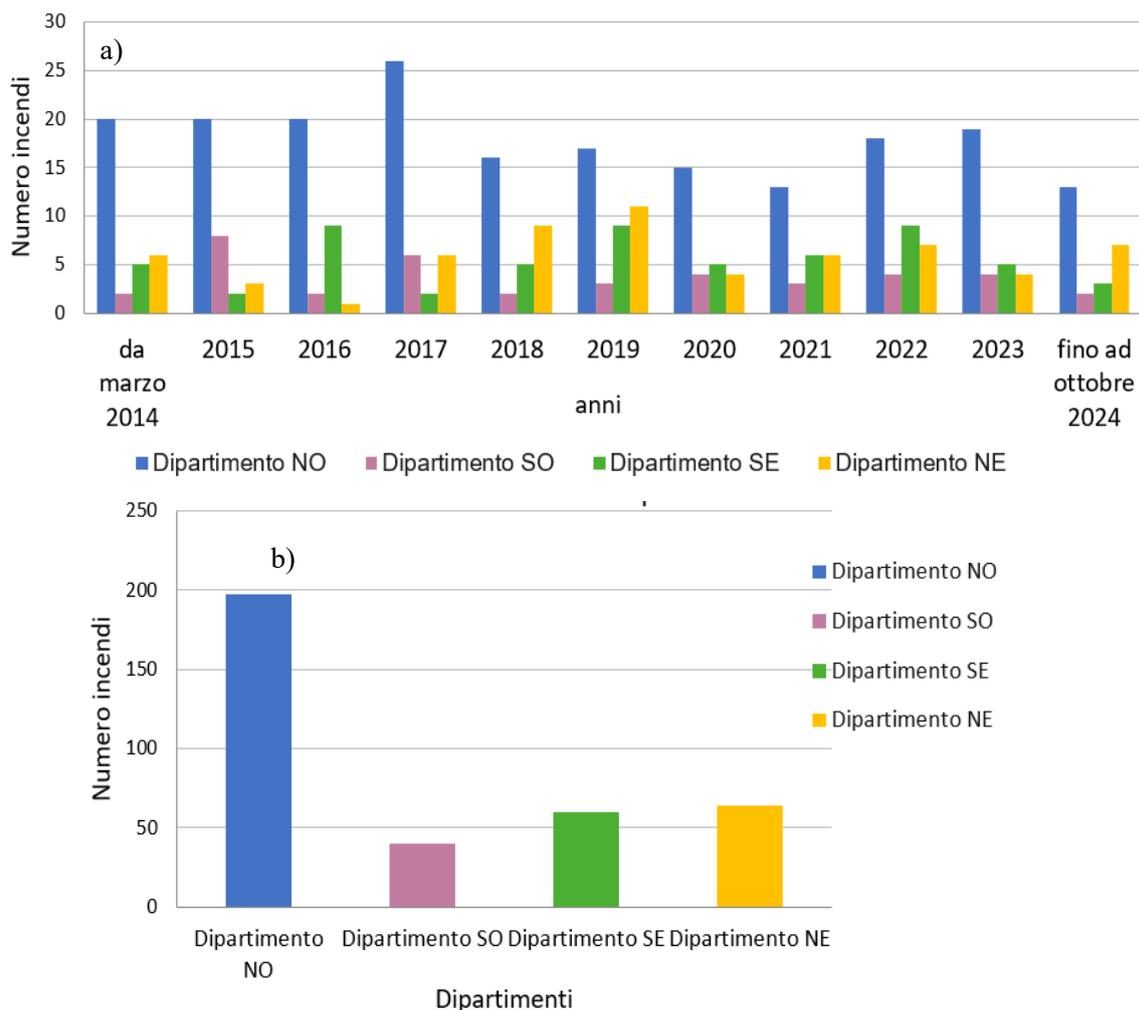
avvenuto l'incendio, l'ubicazione (es. stabilimento, tunnel, capannone, ecc.), una descrizione del materiale/prodotto coinvolto e un'indicazione se l'evento si è verificato all'interno o all'esterno di un edificio.

Per quanto riguarda le attività, queste sono state classificate in modo da distinguere in modo più accurato il contesto in cui si è verificato l'evento, e includono “stabilimenti industriali”, “impianti di trattamento e stoccaggio rifiuti”, “deposito” riferito a spazi o strutture di stoccaggio di materiali o merci, “agricola” riferita al coinvolgimento di aree non urbanizzate (es. arre verdi o ad uso agricolo) e “altro” ovvero una categoria generica che ricomprende tutte le attività che non rientrano nelle precedenti (es. incendi in campi nomadi, di veicoli e in proprietà private). Per la descrizione del materiale/prodotto bruciato è stata adottata una suddivisione dettagliata per facilitare l'analisi delle sostanze coinvolte: le categorie includono “sostanza”, “rifiuti” per indicare quando sono coinvolti materiali di scarto o rifiuti generici, “strutture con amianto” per segnalare la presenza di materiali contenenti amianto, “veicolo” quando l'incendio coinvolge automobili, camion o altri mezzi di trasporto, “elettronica” per dispositivi elettronici o componenti elettrici, “legno” per materiali o oggetti a base di legno, “pneumatici” per il caso specifico di incendi che coinvolgono gomme o pneumatici, e infine le categorie combinate nei casi del coinvolgimento di più delle sopracitate categorie. Al proposito, al fine di migliorare la qualità e la coerenza delle informazioni registrate, quando un evento ha coinvolto più sostanze della stessa categoria o materiali di categorie diverse, è stato deciso di riportare solo il materiale considerato più impattante per l'atmosfera (ad esempio nel caso di un incendio di una struttura di amianto contenente balle di fieno è stata scelta come categoria significativa l'amianto). Inoltre, per evitare ridondanze e confusione nei dati e un'analisi più efficace sono state eliminate tutte le segnalazioni duplicate e sono stati conservati solo i dati più completi relativi a quell'evento.

Successivamente, è stata aggiunta la categoria “sconosciuta” per gestire i casi in cui i dati sono incompleti o per i quali non è possibile determinare con precisione l'attività o il materiale coinvolto nell'evento. Questa aggiunta consente di mantenere la coerenza dei dati nel database anche quando le informazioni non sono completamente disponibili, migliorando la gestione e l'analisi complessiva dei report.

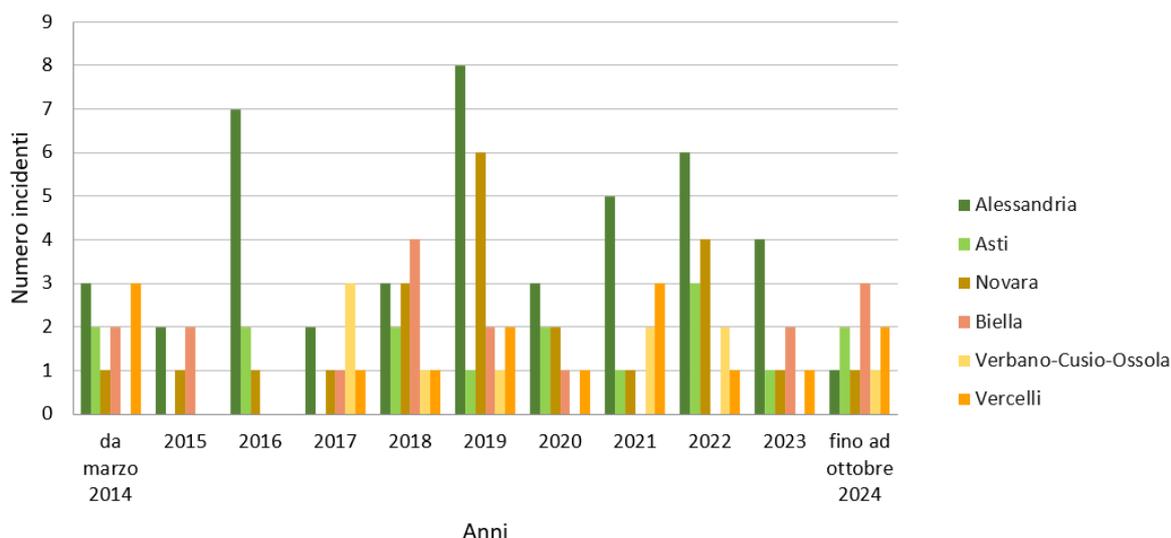
In seguito alle modifiche effettuate nel database, si è passati da un totale di 436 record iniziali a 361 eventi analizzati nel database aggiornato; tali dati sono stati esaminati attraverso un'analisi grafica, mirata a mettere in luce eventuali analogie, differenze e correlazioni, come di seguito dettagliato.

In Figura 3.2a è rappresentato l'andamento degli incendi occorsi tra marzo 2014 e ottobre 2024 suddivisi per i quattro dipartimenti territoriali, per il quale il dipartimento con il maggior numero di incendi è il Nord Ovest, seguito dal Sud Est, dal Nord Est e, infine, dal Sud Ovest, come evidenziato anche dalla Figura 3.2b. In termini quantitativi, il dipartimento Nord Ovest ha registrato una media di circa 18 incendi annui, con un picco significativo nel 2017, che ha visto un aumento a 26 incendi. Per quanto riguarda il dipartimento Nord Est, il numero medio di incendi è di circa 6 all'anno, con un incremento rilevante nel biennio 2018-2019, durante il quale sono stati registrati circa 10 incendi per ciascun anno. Il dipartimento Sud Est ha una media di circa 6 incendi annui, ma presenta tre picchi, rispettivamente nel 2016, 2019 e 2022, con circa 9 incendi registrati in ciascun anno. Infine, il dipartimento Sud Ovest ha una media di 4 incendi annuali, con lievi aumenti osservati negli anni 2015 e 2017, senza però registrare fluttuazioni di grande entità rispetto agli altri dipartimenti.



**Figura 3.2a.** Numero incendi nei quattro Dipartimenti territoriali nel periodo marzo 2014 - ottobre 2024  
**Figura 3.2b.** Numero incendi totali nei quattro Dipartimenti territoriali.

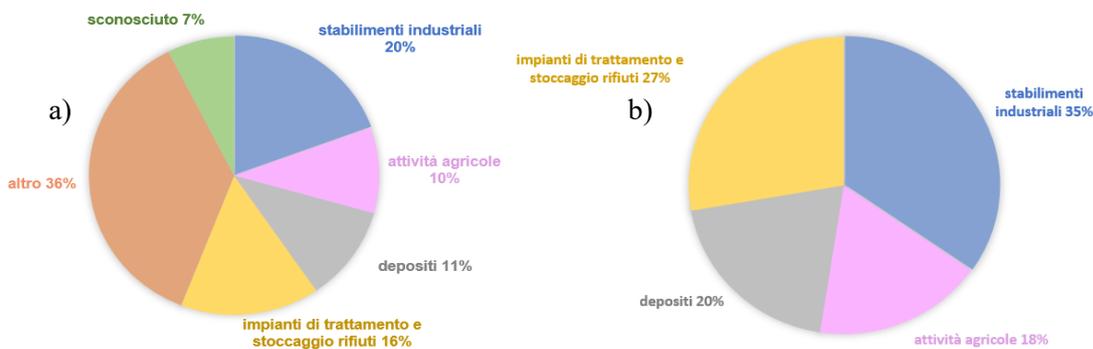
Nella successiva Figura 3.3 è rappresentato il numero di incendi registrati nel periodo esaminato nelle province piemontesi ad eccezione di Torino e Cuneo per le quali i dati corrispondono ai totali riportati rispettivamente per i dipartimenti Nord Ovest e Sud Ovest, nella citata Figura 4a. Dall'analisi del grafico emerge un andamento complessivamente gaussiano per il numero di incendi tra il 2017 e il 2020, con un picco significativo nel 2019 nelle province di Alessandria e Novara, indicando un aumento anomalo di eventi incendiari in quell'anno. Un ulteriore picco si osserva per Alessandria tra il 2020 e il 2024, con un andamento simile a una distribuzione gaussiana, che suggerisce un incremento regolare degli incendi in questo intervallo temporale. Per le restanti province, invece, il numero di incendi segue un andamento altalenante che indicano un comportamento più variabile nel corso degli anni.



**Figura 3.3.** Focus sul numero di incendi nelle province, ad esclusione di Torino e Cuneo, tra marzo 2014 e ottobre 2024.

Nella Figura 3.4a è illustrata la distribuzione delle attività registrate nel database modificato, offrendo una visione dettagliata delle principali categorie presenti. Dall'analisi emerge che la categoria "altro" risulta la più prevalente, rappresentando il 36% dei report, seguita dalla categoria "sconosciuto" con una percentuale del 7%. Poiché queste due categorie non contribuiscono in modo significativo a una comprensione precisa delle attività più rilevanti, si è deciso di escluderle dall'analisi per concentrarsi su quelle che hanno un impatto maggiore e sono meglio definite.

Nella Figura 3.4b, che mostra i dati dopo l'esclusione di "altro" e "sconosciuto", si osserva che le categorie degli stabilimenti industriali e gli impianti di trattamento e stoccaggio rifiuti sono quelle che presentano l'incidenza più alta, rispettivamente con il 35% e il 27% dei report.

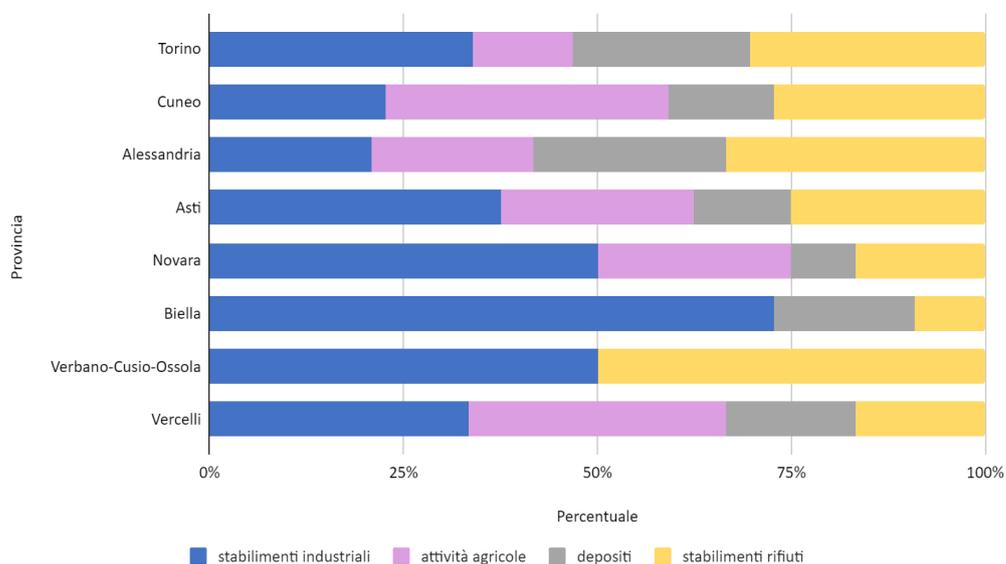


**Figura 3.4a.** Attività coinvolte nei casi di incendi studiati.

**Figura 3.4b.** Attività coinvolte nei casi di incendi studiati ad esclusione di "altro" e "sconosciuto".

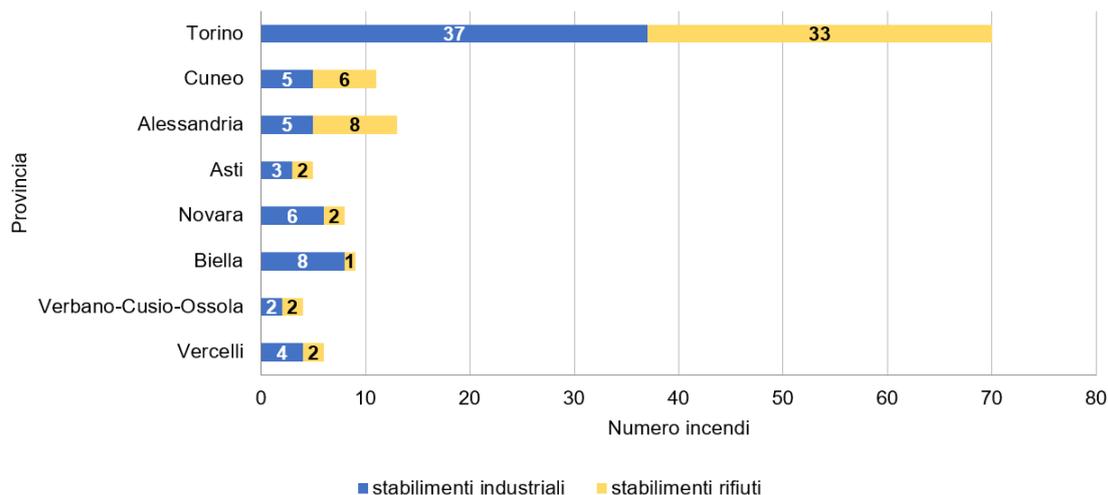
In Figura 3.5 è rappresentata la percentuale delle tipologie di attività colpite da incendi, suddivisa per provincia, escludendo la categoria "altro" per mantenere l'analisi focalizzata esclusivamente sulle attività produttive. La provincia di Torino mostra una maggiore incidenza di incendi che hanno interessato stabilimenti industriali e impianti di trattamento e stoccaggio rifiuti. Questo dato è coerente con le aspettative, poiché Torino è un'importante area industriale e, essendo un grande centro urbano, dispone di numerosi impianti di trattamento e stoccaggio rifiuti e discariche. In provincia di Novara, dove si trova un polo industriale rilevante, il 50% degli incendi ha interessato stabilimenti industriali. Al contrario, la provincia di Alessandria,

pur avendo anch'essa una significativa presenza industriale, registra un maggior numero di incendi nei siti di trattamento e stoccaggio dei rifiuti rispetto agli stabilimenti industriali. Infine, nelle province di Cuneo e Vercelli si riscontra una maggiore frequenza di eventi incendiari che coinvolgono le zone rurali e le superfici agricole, strettamente correlata alle caratteristiche geomorfologiche e all'uso del suolo in queste aree.



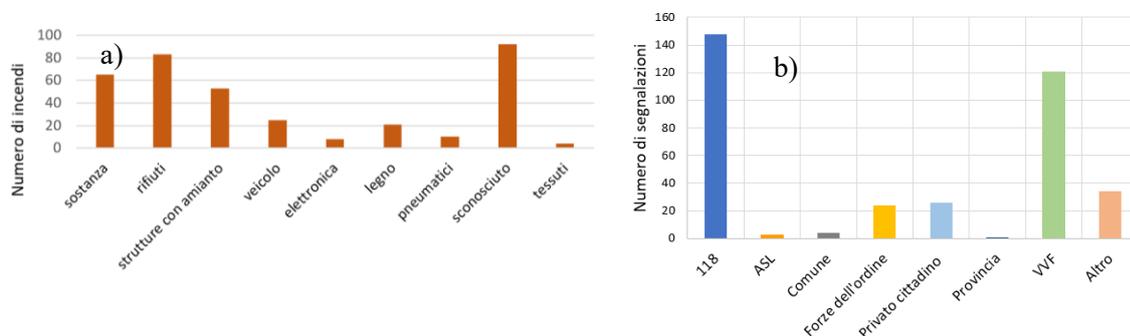
**Figura 3.5.** Percentuale di incendi verificatisi nelle diverse tipologie di attività, esclusa la categoria "altro", per ciascuna provincia.

Alla luce dell'analisi sopra riportata, si è deciso di focalizzarsi sulle due attività maggiormente coinvolte, ovvero gli stabilimenti industriali e gli impianti di trattamento e stoccaggio rifiuti, esaminando la loro ripartizione a livello provinciale. Come illustrato nella Figura 3.6, per quanto riguarda gli stabilimenti industriali il numero di incendi occorsi è stato maggiore nella provincia di Torino, seguita da Biella e Novara mentre gli impianti di trattamento e stoccaggio rifiuti, i dati hanno evidenziato che la provincia con il maggior numero di incendi è Torino, seguita da Alessandria e Cuneo. Per quest'ultimi tale considerazione risulta coerente con la distribuzione geografica in Piemonte, in quanto su un totale di circa 1200 impianti autorizzati (ricomprendendo tutte le tipologie di autorizzazione di cui al D.lgs. 152/2006: Autorizzazione Integrata Ambientale, la procedura ordinaria e semplificata), circa 500 sono in provincia di Torino, 250 in provincia di Cuneo e 150 in provincia di Alessandria e i restanti ripartiti sulle altre province, come risulta dagli archivi di Arpa Piemonte.



**Figura 3.6.** Focus sul numero di incendi che hanno coinvolto stabilimenti industriali e impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti ripartiti per provincia.

La Figura 3.7a illustra la distribuzione dei materiali/prodotti coinvolti negli eventi di incendio analizzati. Dall'analisi emerge che, escludendo la categoria "sconosciuto" (utilizzata per i casi in cui il materiale non è stato identificato), i materiali maggiormente interessati sono i rifiuti e le sostanze chimiche. Questo risultato è coerente con quanto precedentemente osservato ovvero che gli incendi si verificano con maggiore frequenza in contesti industriali e di trattamento e stoccaggio rifiuti. La Figura 3.7b illustra le fonti principali relative alle segnalazioni pervenute ad Arpa Piemonte da cui emerge che gli Enti maggiormente coinvolti sono il 118, i Vigili del Fuoco.



**Figura 3.7a.** Combustibili coinvolti negli incendi analizzati.

**Figura 3.7b.** Ente segnalante degli incendi analizzati.

### 3.2 Approfondimenti su alcuni incendi occorsi

Nell'ambito dell'approfondimento svolto sugli incendi verificati in stabilimenti industriali, nonché in impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti sono state esaminate quattro relazioni relative ad incendi occorsi negli ultimi anni nei diversi Dipartimenti territoriali, redatte dal personale di Arpa Piemonte, con un focus particolare sui risultati delle analisi condotte sui campioni prelevate durante l'intervento in emergenza:

*Dipartimento Nord-Ovest - Incendio stabilimento recupero rifiuti speciali non pericolosi di Beinasco (TO)*

Il 12 dicembre 2021 si è verificato un incendio presso lo stabilimento che recupera rifiuti speciali non pericolosi (materiale plastico derivante da raccolta differenziata). La relazione tecnica di Arpa descrive l'incendio che ha interessato l'intero stabilimento, con un impatto

significativo sulla qualità dell'aria in quanto è durato diversi giorni. I tecnici dell'Arpa, intervenuti per il monitoraggio ambientale, hanno campionato una serie di inquinanti chiave per valutare l'impatto dell'incendio: monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NOx), benzene, toluene, particolato sospeso (PM), diossine e metalli presenti nel particolato. I risultati ottenuti dalle analisi mostrano un incremento nei valori degli inquinanti gassosi, correlato direttamente all'incendio; le concentrazioni rilevate sono risultate inferiori ai limiti di legge stabiliti per la qualità dell'aria.

#### *Dipartimento Nord-Est - Incendio stabilimento chimico di San Pietro Mosezzo (NO)*

Il 29 marzo 2023 si è verificato un incendio presso un'industria chimica di San Pietro Mosezzo (NO) specializzata nella produzione di agenti distaccanti, lubrificanti e soluzioni tecniche per il settore dello stampaggio. Dalla relazione tecnica di Arpa si evince che l'incendio si è originato nelle aree di produzione di prodotti infiammabili e nel magazzino di stoccaggio di solventi e resine infiammabili. Tra le sostanze immagazzinate risultano essere coinvolte paraffina, olio di vaselina, eptano, idrocarburi (C9-C11, C10-C13, n-alceni, isoalceni, ciclici con meno del 2% di aromatici), e cere sintetiche e solventi. Arpa ha campionato sostanze quali il monossido di carbonio (CO), la formaldeide, l'acido solfidrico (H<sub>2</sub>S) e gli idrocarburi non metanici (NMHC).

#### *Dipartimento Sud-Ovest - Incendio magazzino di stoccaggio di Monticello d'Alba (CN)*

Il 19 settembre 2023 si è verificato un incendio presso un magazzino sito a Monticello d'Alba (CN), in cui sono stoccati vari materiali, tra cui plastica, abbigliamento, componenti elettrici e giocattoli. Secondo la relazione tecnica di Arpa durante le operazioni di campionamento, sono state analizzate le sostanze tossiche presenti nell'aria, concentrandosi principalmente su gas irritanti inorganici, tra cui acidi come l'acido cloridrico (HCl), l'acido fluoridrico (HF), l'ammoniaca e il fosgene. Inoltre, sono stati identificati gas irritanti organici, con particolare riferimento alle aldeidi, in particolare la formaldeide. Sono stati misurati inoltre i composti organici volatili (COV) utilizzati come parametro di confronto nei diversi recettori, per stimare eventuali variazioni significative nelle concentrazioni di inquinanti nell'aria.

#### *Dipartimento Sud-Est - Incendio discarica di Castelceriolo (AL)*

Tra agosto e ottobre 2021 si sono verificati due incendi ravvicinati presso un impianto di trattamento e smaltimento rifiuti non pericolosi di Castelceriolo (AL), soggetto ad Autorizzazione Integrata Ambientale. Da entrambe le relazioni tecniche di Arpa si evince che l'incendio ha coinvolto rifiuti riconducibili ad ingombranti triturati quali plastica, legno, stoffa e altri materiali e il personale tecnico ha effettuato i campionamenti mentre erano ancora in corso le operazioni di spegnimento da parte dei Vigili del Fuoco; in particolare sono stati campionati ad esempio i composti organici volatili (COV), monossido di carbonio (CO), sostanze organiche totali, acido cloridrico (HCl), acido fluoridrico (HF) e ammoniaca (NH<sub>3</sub>). A seguito del primo incendio sono stati effettuati ulteriori approfondimenti sia sulla quantità di rifiuti coinvolti durante l'incendio e sia sulla quantità di diossine presenti nelle ceneri derivanti dalla combustione.

### 3.3 Considerazioni conclusive

Dall'analisi delle sopracitate relazioni tecniche emerge che l'intervento di Arpa in situazioni di emergenza, conseguenti a casi di incendi, è orientato alla raccolta di dati specifici riguardanti le modalità di campionamento e le concentrazioni degli inquinanti rilevate; questo perché, in fase emergenziale, in assenza di informazioni preliminari che indichino la presenza di una sostanza identificabile all'interno dell'azienda o struttura coinvolta nell'incendio, l'identificazione del materiale combusto risulta particolarmente complessa.

Di conseguenza, le analisi tendono a focalizzarsi sugli inquinanti più abbondanti nell'aria, ritenuti indicativi delle emissioni tipiche che si generano durante un incendio, soprattutto nei casi in cui i materiali coinvolti siano di natura eterogenea, come nel contesto dei rifiuti. Tale approccio è dettagliatamente illustrato nella procedura tecnica U.RP.T170 di Arpa Piemonte, il cui estratto, riportato nella Figura 3.8, evidenzia le sostanze analizzate in funzione dei materiali coinvolti, fornendo così un quadro metodologico standard per la caratterizzazione degli inquinanti emessi.

materiali coinvolti	zona dell'incendio	CO	HCN	HCl, HBr, HF	NOx	SO2	P2O5	irritanti organici (acroleina, formaldeide, ecc..)	irritanti inorganici (fosgene, ammoniaca)	IPA	PCDD/F, isocianati, PFIB	PM
materiali polimerici	zona 1	+++	+++	+++	++	+	+	++	+	++	++	+++
	zona 2	±	±	+	+	±	-	++	+	±	++	++
legno	zona 1	++	-	-	+	-	-	++	-	+	+	+++
	zona 2	-	-	-	±	-	-	+	-	±	+	±
gomma, pneumatici	zona 1	+++	+	+	+	+++	+	++	+	++	++	+++
	zona 2	±	±	+	±	+++	±	++	±	±	++	++
oli minerali, petrolio	zona 1	++	-	-	-	±	-	++	-	++	++	+++
	zona 2	-	-	-	-	±	-	++	-	±	+	++
+++ probabilità di presenza in quantità molto elevate												
++ probabilità di presenza in quantità elevate												
+ probabilità di presenza												
± possibile presenza in quantità modeste												
- presenza improbabile												
zona 1= immediate vicinanze dell'incendio												
zona 2= all'esterno del perimetro di incendio												

**Figura 3.8.** Sostanze campionate da Arpa Piemonte in fase emergenziale (ARPA Piemonte, 2023).

Ai fini del presente progetto di tesi, si intendeva inizialmente applicare i software, descritti al capitolo 2, per la simulazione modellistica degli incendi occorsi negli impianti di trattamento e stoccaggio rifiuti, per poi confrontare gli esiti di tali simulazioni con le misurazioni in campo degli inquinanti effettuate da Arpa. Tuttavia, tale confronto non è risultato possibile in quanto le relazioni tecniche prodotte dai dipartimenti territoriali dell'Agenzia a seguito dei campionamenti svolti durante gli incendi non fornivano le informazioni necessarie come dati di input ai software, quali ad esempio le formule chimiche dei materiali coinvolti nell'incendio e le relative quantità, nonché le dimensioni delle strutture interessate. Tale osservazione potrebbe costituire uno spunto per migliorare l'integrazione delle informazioni riportate all'interno delle relazioni tecniche dell'Agenzia, pur essendo consapevoli della difficoltà a reperirle soprattutto nell'immediatezza dell'evento.



## 4. Applicazione di metodi e strumenti a casi studio di incendi in ambienti confinati

Per ovviare alla carenza di dati di input necessari per la simulazione mediante software degli incendi realmente occorsi negli impianti di trattamento e stoccaggio rifiuti, si è deciso di identificare un possibile parallelismo tra le attività di stoccaggio rifiuti e quelle di stoccaggio di materiali di composizione nota in magazzini, quali strutture più semplici e meglio caratterizzabili dal punto di vista modellistico.

Di conseguenza, l'ambito della tesi è stato riorientato verso contesti alternativi, mantenendo l'obiettivo di contribuire alla valutazione dell'applicabilità dei modelli di simulazione e metodi nel contesto degli incendi. A tal fine è stato assunto come termine di confronto iniziale le valutazioni riportate nelle analisi del rischio di incidente rilevante di stabilimenti soggetti alla normativa "Seveso". Nello specifico, come primo caso studio è stato esaminato l'incendio in un magazzino di stoccaggio di pneumatici, anche in relazione a quanto emerso dall'analisi storica in Piemonte (vedi capitolo 3), che ha evidenziato il coinvolgimento di tali materiali in una decina di incendi (vedi Figura 3.7a).

Per estendere l'analisi, mantenendo costanti le dimensioni del magazzino (108 m<sup>2</sup> e altezza 7 m) e la capacità di stoccaggio (200 pallet), si è variato esclusivamente il tipo di materiale immagazzinato, concentrando lo studio sulle differenze legate alla natura del combustibile. Quindi, oltre al caso iniziale relativo a un incendio di pneumatici, sono stati simulati ulteriori scenari riguardanti l'incendio di materiali in PVC (Polivinilcloruro), rappresentative delle plastiche, e di fogli di cartone. Lo scopo è quello di esaminare le variazioni nel comportamento dell'incendio in funzione del materiale coinvolto, fornendo un'analisi più dettagliata delle dinamiche di combustione e dell'impatto dei diversi combustibili sulle caratteristiche dell'evento.

Per i tre casi studio sono stati pertanto applicati i modelli di calcolo PHAST e CFAST, per studiare il comportamento dell'incendio rispettivamente all'esterno e all'interno del magazzino; come già anticipato al Capitolo 2, in particolare la sezione "Warehouse" del software PHAST è stata utilizzata per studiare la propagazione e gli effetti dell'incendio all'esterno del magazzino, con particolare attenzione agli scenari di rilascio energetico e alla dispersione di prodotti della combustione nell'ambiente circostante. In particolare, sono stati assunti rispettivamente l'acido cianidrico (HCN), l'acido cloridrico (HCl) e il benzene come sostanze rappresentative degli incendi degli pneumatici, del PVC e del cartone, come illustrato nei paragrafi successivi, assumendo come parametro tossicologico di riferimento per ciascuno di essi il relativo valore di IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) indicato dal NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health).

Parallelamente, CFAST è stato impiegato per analizzare lo sviluppo dell'incendio all'interno del magazzino, fornendo una descrizione dettagliata della dinamica del fuoco, della distribuzione delle temperature e della formazione di fumi tossici in ambienti confinati. Successivamente, per integrare l'analisi, è stato applicato il Metodo ad indici, di cui al DPCM 27/08/2021, nell'ipotesi di assumere tali materiali come un rifiuto solido.

In ciascun caso studio, sono stati ipotizzati due scenari (caso reale e caso semplificato) che si distinguono in base alla presenza nel magazzino delle misure di prevenzione, protezione e sicurezza (sistemi spegnimento automatico tipo sprinkler), come di seguito meglio dettagliato.

Si precisa che i risultati delle simulazioni su PHAST per entrambi gli scenari mantengono gli stessi valori e si verificano alle stesse distanze per entrambe le classi di stabilità atmosferica. Dal punto di vista tecnico, la presenza di misure di prevenzione, protezione e sicurezza nel magazzino, rappresentate dal caso reale, dovrebbe influire direttamente sulla dinamica dell'incendio e, di conseguenza, sulla generazione e dispersione degli inquinanti. Tuttavia, nel caso in esame, la presenza di sistemi antincendio non parrebbe influenzare la dinamica dell'incendio e tale criticità potrebbe essere riconducibile, ad esempio, alle impostazioni della sezione "Warehouse" del software, che potrebbero non considerare dettagliatamente l'interazione tra il controllo dell'incendio e la dispersione esterna.

## 4.1 Incendio di magazzino contenente pneumatici

Per il caso studio relativo all'incendio di un magazzino adibito allo stoccaggio di pneumatici è stata assunta una quantità complessiva di 72000 kg di materiale, calcolata considerando i 200 pallet contenenti 36 pneumatici su ciascun pallet e un peso medio di circa 10 kg a pneumatico ed è stato assunto un potere calorifico inferiore pari a 25 MJ/kg (Certifico Srl, 2021), valore scelto per la sua somiglianza con quello della schiuma rigida di poliuretano, che come indicato nel Quintiere (1998) presenta termiche analoghe alla gomma vulcanizzata, quali ad esempio la bassa conduttività e la buona resistenza a temperature elevate.

### 4.1.1 Simulazione mediante PHAST

Nella sezione "Warehouse" del software PHAST sono stati inseriti i valori di input relativi alla struttura di stoccaggio (superficie 108 m<sup>2</sup>, altezza 7 m, caratterizzato da pareti in mattone e una porta di 3x3 m<sup>2</sup>) e la formula, desunta da Gustin et al. (2017), corrispondente a C<sub>9</sub>H<sub>12</sub>N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rappresentativa di un'unità ripetitiva del polimero di poliuretano a cui viene assimilata la gomma vulcanizzata degli pneumatici.

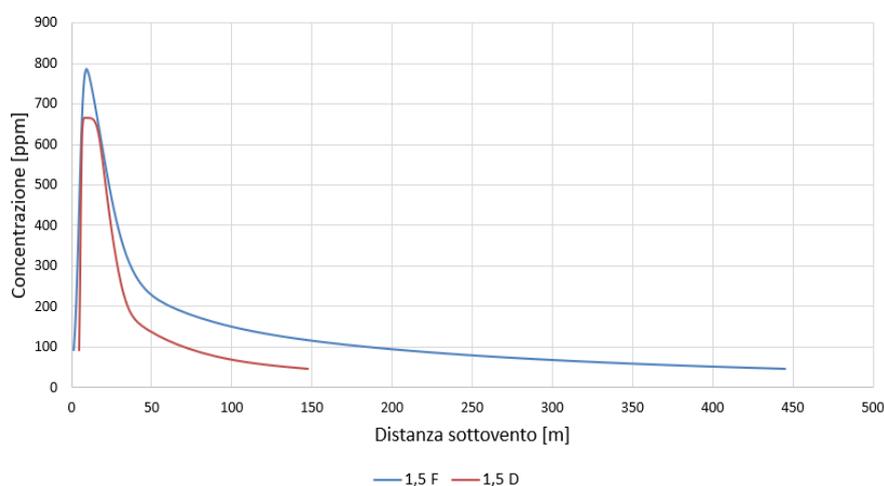
Per quanto riguarda le altre condizioni della simulazione sono stati lasciati i valori di default proposti dal PHAST: durata dell'incendio pari a 1800 s nonché la velocità del vento pari a 1.5 m/s.

Tra le informazioni fornite dalla sezione "Warehouse" del software PHAST sono elencati i prodotti della combustione completa in uscita dal capannone (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e NO<sub>2</sub>) che si sviluppano da fenomeni di incendio a partire materiali aventi la formula chimica C<sub>9</sub>H<sub>12</sub>N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; tuttavia, ai fini del presente lavoro di tesi, si è ritenuto di considerare la possibile formazione di altri prodotti con maggiori caratteristiche di tossicità che si possono sviluppare da una combustione incompleta di pneumatici, quale ad esempio l'acido cianidrico (HCN), come indicato da numerosi studi di letteratura (Singh et al., 2015; Kwon & Castaldi, 2009). Ancorché la quantità di composti azotati sia ridotta all'interno della formulazione degli pneumatici, rendendo quindi la formazione di HCN trascurabile rispetto ad altri prodotti di combustione quali ad esempio gli IPA, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>, come desunto da studi di letteratura scientifica (Cattani, 2024; Rossi, 2021), si è ritenuto rappresentativo di simulare la dispersione di HCN come sostanza rappresentativa di un incendio di pneumatici.

Nella presente analisi sono state condotte due simulazioni comparative relative al caso reale e al caso semplificato nella due classi di stabilità atmosferica 1.5 F, caratterizzata da scarsa turbolenza atmosferica (stabilità: molto stabile), e 1.5 D, caratterizzata da maggiore turbolenza che favorisce una dispersione più rapida della nube tossica (stabilità: neutra); si riportano nel seguito gli output più rappresentativi riguardanti l'andamento della massima concentrazione della nube tossica, l'altezza della nube di fumo in vista laterale e la letalità nello spazio dei

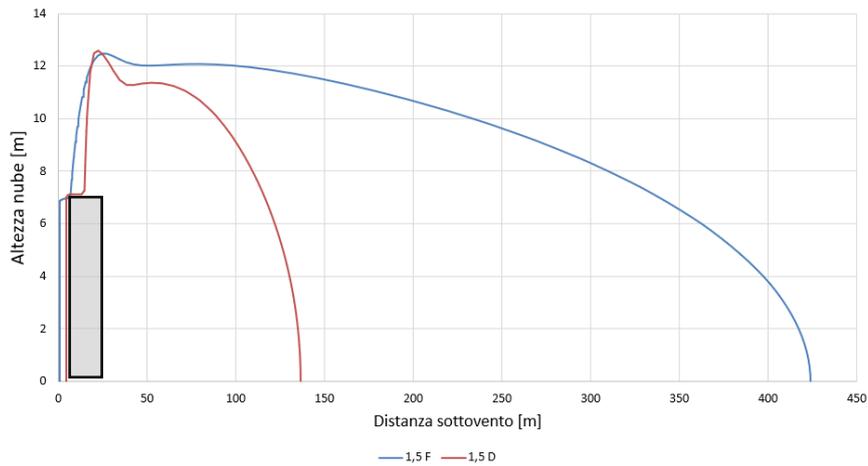
prodotti di combustione. Si precisa che l'analisi è stata condotta utilizzando una concentrazione soglia corrispondente all'IDLH di 50 ppm per l'acido cianidrico (HCN), assunto come sostanza di riferimento. Come descritto nel Capitolo 2, la sezione “Warehouse” del software PHAST, tra i parametri di input, non richiede l'inserimento della portata massica o volumetrica della sostanza tossica rilasciata ma viene richiesta la concentrazione di riferimento dell'inquinante, che in questo caso è stata assunta pari al valore dell'IDLH.

Nel Grafico 4.1 è rappresentata la massima concentrazione della nube tossica generata dall'incendio all'esterno del magazzino, in funzione della distanza sottovento, a 30 minuti, considerando il caso semplificato. Sebbene i profili di concentrazione risultino simili per entrambe le condizioni atmosferiche, si osserva che la classe F permette alla nube di raggiungere un picco di concentrazione più elevato, pari a circa 800 ppm, all'uscita del capannone. Al contrario, la classe D presenta un picco di concentrazione inferiore, circa 650 ppm, alla stessa distanza. Inoltre, la curva di concentrazione per la classe D decresce più rapidamente rispetto a quella della classe F, suggerendo una dispersione più efficace della nube tossica ed evidenziano il ruolo della stabilità atmosferica nella distribuzione e nella concentrazione delle sostanze tossiche rilasciate durante l'incendio.



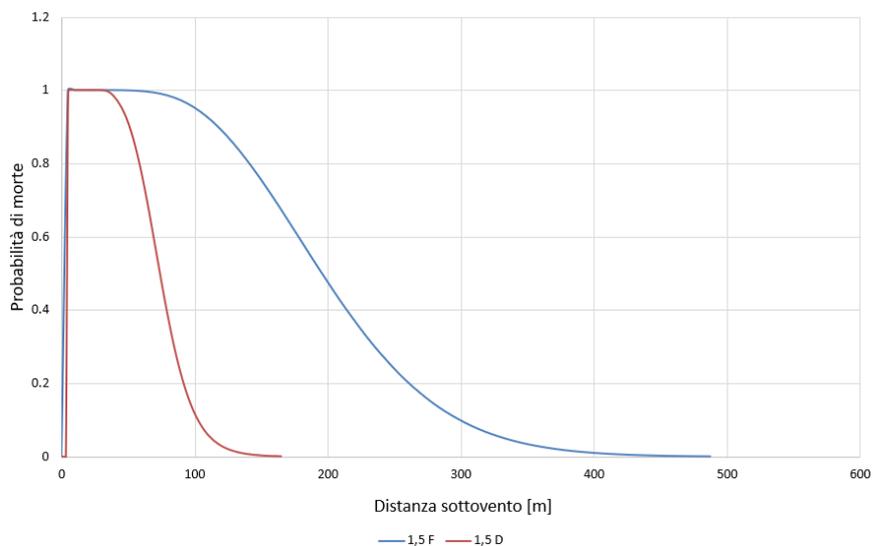
**Figura 4.1.** Andamento della massima concentrazione della nube tossica nello spazio (riferite a 30 minuti) – caso reale e semplificato pneumatici (le curve sono sovrapposte).

In Figura 4.2 è rappresentata l'altezza della nube di fumo nella vista laterale ad una concentrazione di 50 ppm (pari all'IDLH dell'acido cianidrico), mostrando come la stabilità atmosferica influenzi la distribuzione verticale e orizzontale della nube tossica nel caso semplificato. In entrambe le condizioni atmosferiche la nube raggiunge un'altezza massima di circa 13 metri dal suolo: nella classe F, caratterizzata da una bassa turbolenza, la nube si disperde con maggiore difficoltà e raggiunge distanze orizzontali più ampie, quasi 420 metri oltre il capannone (rappresentato in figura da un rettangolo nero); mentre in classe D, la nube si disperde più rapidamente, percorrendo una distanza orizzontale inferiore, pari a circa 140 metri dal capannone. Questi risultati sottolineano il ruolo della stabilità atmosferica nel determinare la forma e l'estensione della nube tossica; infatti, si osserva che nella classe F, direttamente correlata alla diffusività della materia turbolenta, la dispersione è minore, portando a una maggiore estensione orizzontale della nube. Al contrario, nella classe D, la maggiore turbolenza favorisce una dispersione più rapida dei contaminanti, ma su distanze più ridotte.



**Figura 4.2.** Andamento dell'altezza della nube tossica nello spazio nella vista laterale (riferite a 50 ppm) – caso reale e semplificato pneumatici (le curve sono sovrapposte).

Il software PHAST propone anche il grafico che rappresenta l'andamento della letalità nello spazio, espressa come probabilità di morte, basata su modelli dose-risposta che tengono conto di parametri come la durata dell'esposizione e la tossicità specifica della sostanza; al proposito si assume come parametro tossicologico di riferimento LC50 (Lethal Concentration 50%) che corrisponde alla concentrazione che provoca la morte del 50% dei soggetti esposti (per l'acido cianidrico tale valore corrisponde a circa 100 ppm). In Figura 4.3 è rappresentato l'andamento della letalità in funzione della distanza dalla sorgente, riferito ad un tempo di esposizione di 30 minuti; tale grafico mostra come la probabilità di morte raggiunge il valore massimo pari a 1 in prossimità del magazzino per entrambe le condizioni atmosferiche. Questo comportamento è correlato alle concentrazioni di fumi rilevate in prossimità dell'area esterna al magazzino, che risultano pari a 800 ppm e 650 ppm rispettivamente per le condizioni atmosferiche 1,5 F e 1,5 D, bene al di sopra del valore di LC50. All'aumentare della distanza dal magazzino decresce ovviamente la probabilità di letalità anche in relazione alla diminuzione della sostanza tossica per effetto della diluizione.



**Figura 4.3.** Andamento della letalità nello spazio riferite al valore di LC50 (30 minuti) – caso reale e semplificato pneumatici (le curve sono sovrapposte).

## 4.1.2 Modellazione dell'incendio mediante CFAST

Coerentemente con le ipotesi adottate per il software PHAST, anche nella simulazione con CFAST è stato considerato un incendio di schiuma rigida di poliuretano e sono state mantenute le dimensioni del magazzino e la massa del combustibile stoccato. È stata impostata una ventilazione naturale all'interno di un magazzino, e le condizioni ambientali sono state mantenute sui valori di default: temperatura interna ed esterna di 20°C, umidità relativa del 50% e pressione atmosferica di 1 atm.

Nella tabella 4.1 sono riportati i valori dei dati di input utilizzati nella simulazione e calcolati attraverso le formule del Capitolo 2 in particolare: la portata massima d'aria necessaria ( $\dot{m}_{aria,max}$ ) e la massima potenza rilasciata ( $HRR_{max,chiuso}$ ), la costante  $\alpha$  calcolata assumendo che la curva HRR nel tempo segua un profilo di tipo “fast” ed infine il tempo di picco ( $t_{picco,chiuso}$ ), utilizzando il valore di massima potenza termica precedentemente calcolato e il tempo nella fase stazionaria ( $t_{steady,chiuso}$ ).

**Tabella 4.1.** Parametri di input della simulazione sul software CFAST – caso magazzino contenente pneumatici.

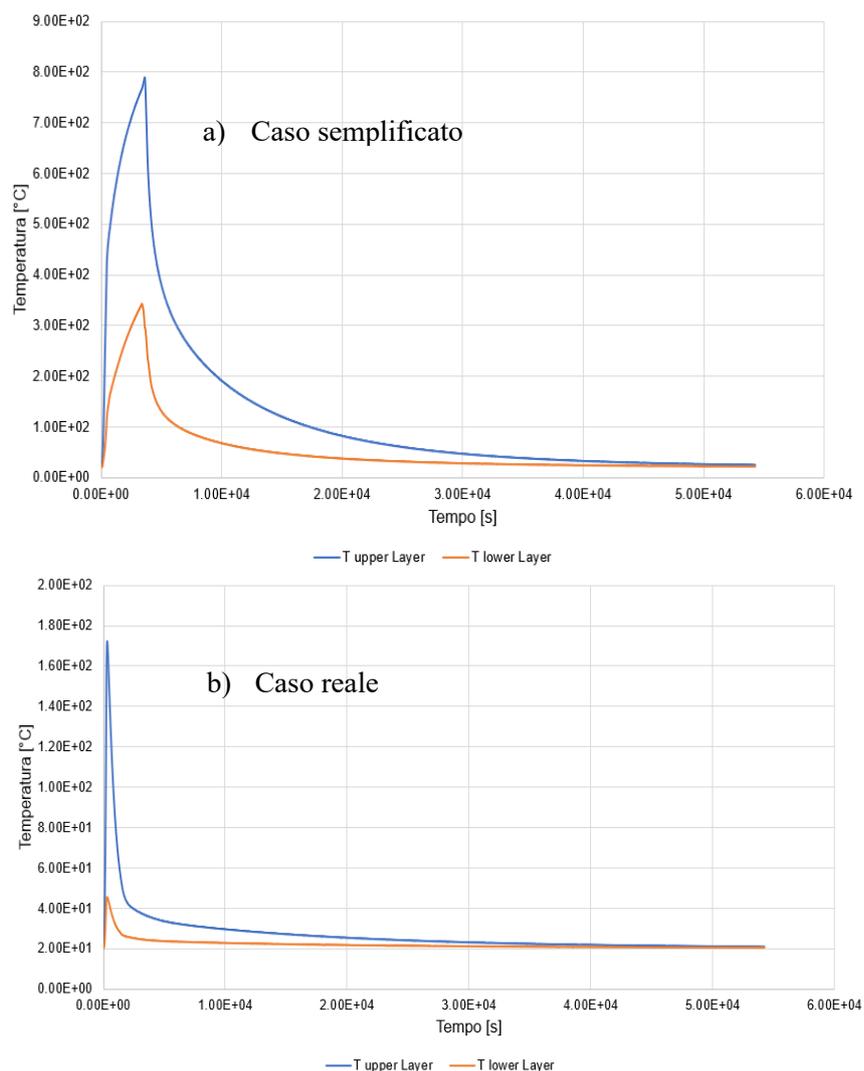
<u>Parametri di input</u>	<u>Valore</u>
$\dot{m}_{aria,max}$ [kg/s]	7.79
$HRR_{max,chiuso}$ [kW]	23382.69
$\alpha$ [kW/s <sup>2</sup> ]	0.044
$t_{picco,chiuso}$ [s]	725.33
$t_{steady,chiuso}$ [s]	26666.67

Dall'output della simulazione sono stati estratti i dati della portata massica dei fumi emessi, della massa totale dei prodotti di combustione e della curva di rilascio termico, che illustra l'andamento della potenza termica durante l'incendio, nonché della temperatura. È importante sottolineare che i grafici della temperatura coprono un intervallo temporale di 15 ore, corrispondenti al momento in cui la temperatura del upper layer del magazzino raggiunge la temperatura ambiente. Per quanto riguarda la portata massica dei fumi emessi e della pirolisi e le curve HRR, questi dati sono stati analizzati su una durata di circa 1 ora, in quanto, oltre tale intervallo, i valori tendono a stabilizzarsi e ad avvicinarsi allo zero, rendendo le ulteriori analisi poco significative.

Analogamente alle simulazioni effettuate con il software PHAST, sono state condotte due simulazioni comparative relative al caso reale e caso semplificato di cui di seguito si riportano gli output più rappresentativi riguardanti l'andamento della temperatura, della portata massica della nube di fumi e della pirolisi e del HRR.

La Figura 4.4a rappresenta l'andamento della temperatura nel tempo durante un incendio nel caso semplificato. Dal grafico si nota che, nella parte superiore del magazzino (upper layer), la temperatura cresce rapidamente, raggiungendo un picco di circa 800 °C dopo circa un'ora; successivamente, si osserva una graduale decrescita che porta la temperatura a stabilizzarsi a temperatura ambiente dopo circa 13 ore. Nella parte inferiore del magazzino (lower layer), l'andamento della temperatura segue un comportamento analogo ma meno pronunciato: la temperatura raggiunge un picco massimo di circa 350 °C nello stesso intervallo temporale, per poi decrescere gradualmente fino a stabilizzarsi a temperatura ambiente in circa 7 ore. Questo andamento evidenzia una stratificazione termica significativa, con una maggiore concentrazione di calore nella parte superiore.

La Figura 4.4b, invece, mostra l'andamento della temperatura nel tempo per un incendio simulato nel caso reale considerando la presenza di un sistema di protezione attivo (sprinkler) che si attiva al raggiungimento della temperatura di 100°C, modificando in modo significativo l'andamento della temperatura. Infatti, dal grafico emerge che, nell'upper layer, la temperatura raggiunge rapidamente circa 170 °C nei primi 5 minuti, ma l'attivazione degli sprinkler determina una rapida riduzione della temperatura, che si stabilizza intorno ai 20 °C dopo circa 3 ore. Per quanto riguarda il lower layer, si osserva un leggero incremento della temperatura, che raggiunge un massimo di circa 40 °C nello stesso tempo e successivamente diminuisce lentamente fino a quella ambientale. Questo comportamento indica che il sistema di protezione attivo limita significativamente l'accumulo di energia termica nella parte inferiore del magazzino ed evidenzia l'impatto di tali sistemi nel contenere la propagazione dell'incendio e nel mitigare gli effetti termici.

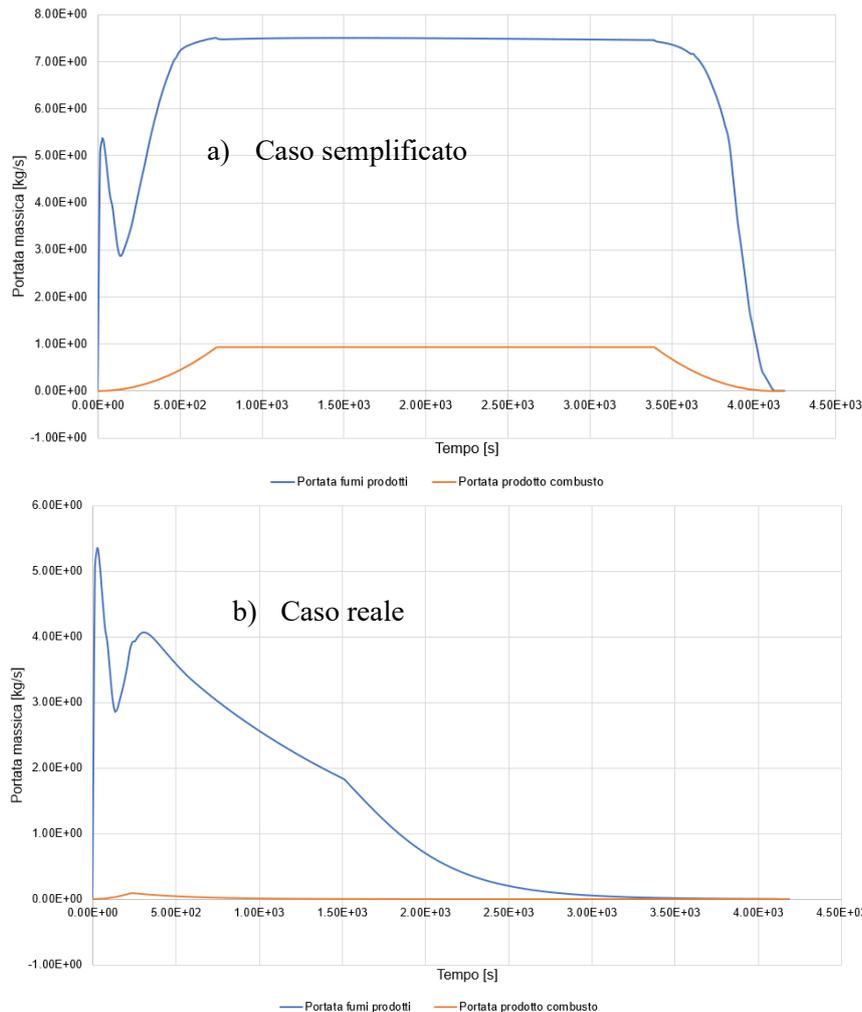


**Figura 4.4a. e Figura 4.4b.** Andamento della temperatura nel tempo – caso semplificato e caso reale pneumatici.

Analizzando la Figura 4.5a, che descrive l'andamento della portata massica della nube di fumi e della pirolisi nel caso semplificato, è possibile vedere l'evoluzione del fenomeno combustivo e la quantità di materiale combustibile trasformato in fumi e gas. La portata massica dei fumi aumenta rapidamente nei primi 30 secondi, raggiungendo un picco di circa 5,30 kg/s; questo incremento iniziale riflette la combustione rapida del materiale infiammabile e la conseguente

produzione di fumi durante le fasi iniziali dell'incendio. Successivamente, si osserva una diminuzione della portata massica che si riduce a circa la metà del valore massimo iniziale; tuttavia, dopo questa fase, la portata torna a crescere, stabilizzandosi intorno a 7,5 kg/s entro 750 secondi dall'inizio dell'incendio. Questo valore si mantiene pressoché costante per circa un'ora, fino a quando la portata subisce una rapida diminuzione, azzerandosi gradualmente con l'esaurimento del materiale combustibile disponibile. La curva della pirolisi, invece, rappresenta la decomposizione termica del materiale combustibile in assenza di ossigeno. Tale curva mostra una crescita iniziale di tipo quadratico, il cui andamento risulta simile a quello previsto per la potenza termica nel tempo. Tuttavia, è evidente dal grafico che la portata massica dei fumi è maggiore, questo perché rappresenta il risultato complessivo della combustione, che coinvolge sia i prodotti della pirolisi sia l'interazione con l'ossigeno e altri fattori ambientali, mentre la pirolisi è un processo legato solo alla decomposizione termica del combustibile.

Nella Figura 4.5b, che rappresenta lo stesso scenario nel caso reale, si osserva un andamento differente. La portata massica dei fumi raggiunge un picco simile nello stesso tempo, tuttavia, invece di stabilizzarsi o crescere ulteriormente come nel caso semplificato, la curva subisce un decremento graduale, fino a circa un'ora, quando scende rapidamente a zero. Questo andamento riflette l'efficacia del sistema di protezione attivo nel controllare l'incendio, limitando la produzione di fumi attraverso l'abbattimento delle temperature e la riduzione del materiale combustibile disponibile. La curva della pirolisi è pressoché nulla, evidenziando che l'incendio viene rapidamente soffocato dal sistema di protezione, che limita la temperatura necessaria per attivare il processo di decomposizione termica.

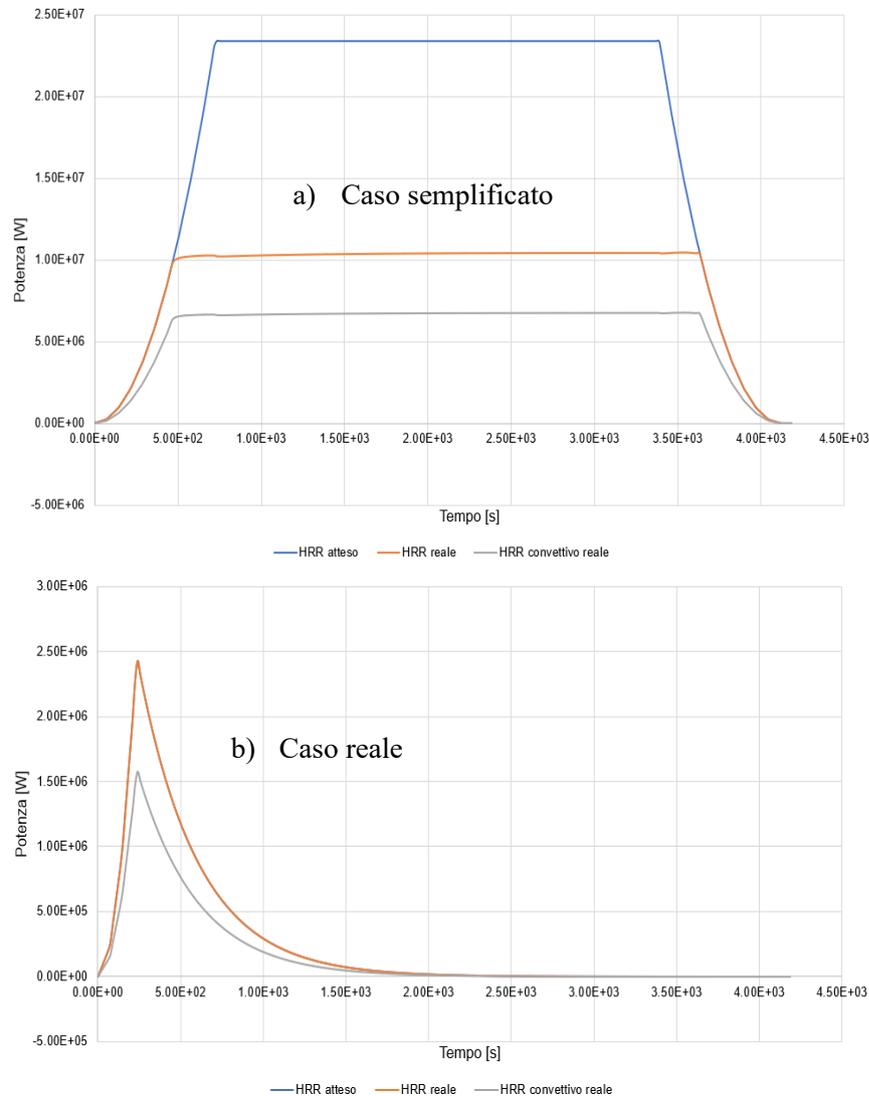


**Figura 4.5a. e Figura 4.5b.** Andamento della portata massica della nube e della pirolisi sviluppata - caso semplificato e caso reale pneumatici.

Nel grafico 4.6a, è rappresentato l'andamento della curva HRR nel caso semplificato, in cui si osserva che la curva HRR "reale", corrispondente alle condizioni sperimentali, è caratterizzata da un andamento simile a quello della curva HRR "ipotizzata", corrispondente alle previsioni teoriche, ma raggiunge un picco massimo di circa  $1E4$  kW in circa 8 minuti, mentre la curva HRR "ipotizzata" presenta un picco più elevato coerente con dati di input (vedi Tabella 4.2). Tale differenza tra le due curve può essere attribuita principalmente al fatto che la curva HRR "ipotizzata" si basa su parametri teorici, come il calore di combustione, la massa del combustibile e i tempi di pirolisi, che potrebbero non rispecchiare perfettamente il comportamento reale del materiale o le condizioni ambientali. Nel grafico è altresì riportata la curva HRR "convettiva reale" che rappresenta la parte dell'energia rilasciata durante la combustione dispersa attraverso altre modalità, come il trasferimento per irraggiamento, e che non contribuisce direttamente al flusso convettivo. Tale curva segue un andamento analogo alle due precedenti ma raggiunge un picco massimo più basso, pari a  $6.52E3$  kW, nello stesso intervallo di tempo.

Nel grafico 4.6b, che considera il caso reale, le curve HRR "reale" e "ipotizzata" risultano pressoché sovrapponibili, evidenziando una corrispondenza tra i dati teorici e quelli sperimentali in quanto entrambe raggiungono un picco massimo di  $2.40E3$  kW in soli 4 minuti

e poi decrescono con un andamento quadratico, annullandosi dopo circa 30 minuti. Anche in questo caso è rappresentata la curva HRR convettiva reale che mantiene un andamento simile alle altre due curve ma raggiunge un picco massimo inferiore, pari a circa  $1.50E3$  kW, nello stesso intervallo di tempo.



**Figura 4.6a. e Figura 4.6b.** Andamento delle curve HRR - caso semplificato e caso reale pneumatici.

#### 4.1.3 Applicazione del Metodo ad indici (DPCM 27/08/2021)

Il Metodo ad indici, di cui al DPCM 21/08/2021, è stato applicato al caso degli pneumatici nell'ipotesi di assumerli come materiale esausto; tali rifiuti solidi sono costituiti da una miscela di gomma naturale e sintetica, nero di carbonio, acciaio, zolfo, oli aromatici e diversi additivi chimici, al fine di verificarne la coerenza con i risultati dei due modelli di calcolo.

Per il caso in esame sono stati analizzati due scenari applicando le formule descritte al capitolo 2 che richiamano le tabelle riportate nel Metodo ad indici; per entrambi i casi è stato assunto il fattore di debito FD, pari a 20, a cui corrisponde la presenza di un corso d'acqua limitrofo allo stabilimento, e non valorizzando il fattore Pt in quanto lo stabilimento non è un impianto di trattamento di rifiuti. Le due configurazioni (caso reale e caso semplificato) si distinguono in

base alla presenza delle misure di prevenzione, protezione e sicurezza, come di seguito illustrato.

Il calcolo del carico d'incendio specifico  $q_f$ , secondo la formula 2.6, ha portato in entrambi i casi ad un valore pari a 12971.83 [MJ/m<sup>2</sup>], considerando oltre alla massa del materiale stoccato, al suo potere calorifico e all'area del magazzino, anche il fattore di partecipazione alla combustione e il fattore di limitazione della partecipazione, entrambi impostati pari a 1.

Nel caso reale, per calcolare il fattore di credito FC sono state considerate tutte le misure di prevenzione (Pre) e di protezione attiva (Proa), previste dal metodo ad indici, attribuendo ad entrambe i punteggi massimi rispettivamente pari a 175 e 200. Anche per la security (Sec) sono state considerate tutte le voci previste dal metodo ad indici ottenendo il punteggio massimo pari a 70 come somma delle singole voci. Per la protezione passiva (Prop), è stata considerata come unica misura la presenza delle vasche di raccolta delle acque di spegnimento, con un punteggio pari a 30. Quindi l'indice di rischio IR risulta pari a 1045, corrispondente ad un livello di rischio medio al quale è associato una distanza di attenzione pari a 300 m (vedi Tabella 2.2).

Nel caso semplificato, secondo quanto riportato nel Metodo ad indici, per calcolare il fattore di credito FC per le misure di prevenzione (Pre) sono stati considerati gli obblighi previsti dal D.Lgs. 81/08 e dal piano per il mantenimento del livello di sicurezza antincendio, attribuendo un punteggio pari a 100, e per le misure di protezione attiva (Proa), sono stati contemplati gli idranti, sia interni che esterni, e gli estintori, attribuendo un punteggio pari a 100. Le misure di security (Sec) e di protezione passiva (Prop), invece, sono rimaste identiche a quelle analizzate nello scenario precedente. Da ciò deriva un indice di rischio IR complessivo pari a 1220, corrispondente ad un livello di rischio medio-alto, al quale è associato una distanza di attenzione pari a 400 m (vedi Tabella 2.2).

Nel seguito sono riportati i valori dei parametri considerati nei due casi studio (reale e semplificato):

**Tabella 4.2.** Dati input e output Metodo ad Indici (DPCM 27/08/2021) - caso reale e caso semplificato magazzino contenente pneumatici

<u>Parametri</u>	<u>Caso reale</u>	<u>Caso semplificato</u>
$q_f$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	12971.83	12971.83
Pr	1500	1500
Pt	-	-
FC = Pre + Proa + Prop + Sec	475 = 175+200+30+70	300 = 100+100+30+70
FD	20	20
<b>IR</b>	<b>1045</b>	<b>1220</b>
<b>Livello di rischio</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio – alto</b>
<b>Distanza di attenzione</b>	<b>300 m</b>	<b>400 m</b>

Successivamente si è cercato di valutare la variazione dell'indice di rischio in funzione dei parametri, considerato che i valori ottenuti nei due casi risultano molto prossimi al valore di soglia pari a 1100 che costituisce il limite per il passaggio al livello di rischio da medio a medio-alto. I principali parametri considerati sono stati quelli legati alle misure di prevenzione e protezione che come sopra dettagliato posso influenzare il livello di rischio; un ulteriore intervento fattibile in entrambi i casi sarebbe l'introduzione della compartimentazione tra le aree operative interne, che consentirebbe di confinare un potenziale incendio e limitarne le conseguenze. L'introduzione della compartimentazione comporterebbe un aumento del valore di protezione passiva (Prop) di 100 e quindi il fattore FC risulterebbe nei due casi

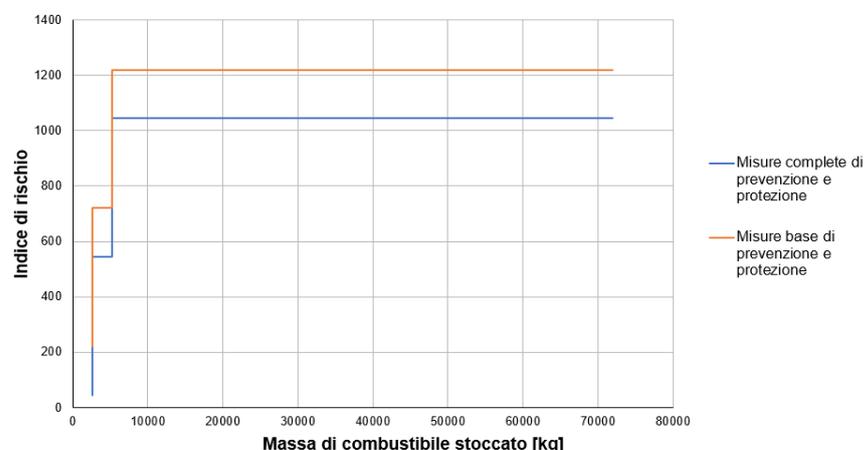
rispettivamente pari a 575 e 400 con conseguente riduzione dell'indice di rischio a 945 e 1120; tuttavia questa diminuzione non è sufficiente per ridurre il livello di rischio.

Si è proceduto quindi agendo sul parametro Pr relativo allo stoccaggio dei rifiuti riducendo il carico d'incendio specifico ( $q_f$ ) variando la massa del materiale combustibile immagazzinato. Inizialmente, sono state prese in considerazione riduzioni del 10%, 20%, 30% e 40% della massa; tuttavia, anche con queste diminuzioni, il carico d'incendio specifico ( $q_f$ ) è rimasto nella fascia alta ( $q_f > 1200 \text{ MJ/m}^2$ ), mantenendo il rischio a livello medio.

Per questo motivo, è stata condotta un'analisi di sensibilità mirata a identificare una riduzione della massa che potesse portare il valore del carico d'incendio specifico a una fascia inferiore. Tale analisi ha rivelato che è stata necessaria una riduzione della massa fino a 5184 kg, pari ad una riduzione del 92.8% della massa iniziale, per ottenere un carico d'incendio specifico compatibile con un livello di rischio medio-basso. Successivamente, è stato determinato che la massa necessaria per raggiungere un livello di rischio basso è pari a 2592 kg, corrispondenti ad una riduzione del 96.4% della massa iniziale. L'andamento dell'indice di rischio, in funzione della massa, è stato rappresentato nel grafico sottostante, illustrando la relazione diretta tra la riduzione della massa e la diminuzione dell'indice di rischio.

Dalla Figura 17, si osserva che l'indice di rischio (Pr), in funzione della massa di materiale combustibile, presenta un andamento a gradini. Questo comportamento, come già ricordato, è intrinsecamente legato al metodo di calcolo dell'indice Pr, che è determinato dal valore del carico d'incendio specifico ( $q_f$ ). Quest'ultimo viene classificato in intervalli predefiniti ( $q_f < 600$ ,  $600 < q_f < 1200$  e  $q_f > 1200$ ), all'interno dei quali il valore di Pr rimane costante (rispettivamente pari a 500, 1000 e 1500). Nel caso reale, si osservano due riduzioni significative dell'indice di rischio incendio (IR): nella prima fase, l'indice IR diminuisce da 1045 a 545, corrispondente a una riduzione del livello di rischio da medio a medio-basso. Successivamente, l'indice IR diminuisce ulteriormente da 545 a 45, con un'ulteriore riduzione del livello di rischio da medio-basso a basso (vedi Tabella 2.2).

Nel caso semplificato, l'indice di rischio segue un andamento diverso in quanto diminuisce inizialmente da 1220 a 720 (livello di rischio da medio-alto a medio) e poi in modo più significativo da 720 a 220 (livello di rischio medio a basso), mantenendo la stessa variazione di massa osservata nel caso reale. Questa riduzione su tre livelli dell'indice di rischio dimostra che, anche con sistemi di protezione “base”, è possibile raggiungere un livello di rischio finale comparabile a quello ottenuto con sistemi di prevenzione e protezione “completi”. Infatti, a parità di massa di materiale combustibile il livello di rischio risulta basso in entrambi i casi.



**Figura 4.7.** Analisi della variazione dell'indice di rischio in relazione alla massa stoccata – caso studio magazzino pneumatici.

L'analisi rivela che l'implementazione di tutti i sistemi di prevenzione e protezione, previsti dal Metodo ad Indici, non porta ad una riduzione del livello di rischio significativa contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare.

Un'ulteriore criticità, emersa dall'applicazione del Metodo ad indici, riguarda la struttura del magazzino; infatti, il valore dell'indice di rischio rimane invariato, indipendentemente dal fatto che il magazzino sia aperto o chiuso, non considerando quindi le diverse configurazioni che potrebbero influenzare la propagazione dell'incendio. Inoltre, non viene fatta alcuna distinzione tra i diversi tipi di sistemi di protezione attiva (Proa): ad esempio, i sistemi di estinzione automatici non sono distinti tra quelli a base d'acqua e quelli a base schiuma, sebbene questa differenza possa risultare talvolta sostanziale.

Infine, un'ulteriore criticità è emersa nella determinazione dell'indice FD, che valuta la distanza tra il perimetro dell'impianto e il bersaglio sensibile esterno, senza tenere conto della reale ubicazione del magazzino coinvolto nell'incendio.

#### 4.1.4 Analisi dei risultati

Nel contesto del caso studio del magazzino di pneumatici, l'obiettivo principale è stato quello di valutare la dispersione della nube di fumi generata da un incendio all'interno della struttura e le relative distanze di attenzione per la pianificazione delle emergenze. A tal fine, sono stati utilizzati due approcci distinti: il metodo ad indici e il software PHAST. La sezione "Warehouse" del software PHAST ha restituito distanze di dispersione della nube variabili a seconda della classe di tossicità dei fumi; in particolare, per la classe F la distanza di dispersione della nube è stata di 420 m, mentre per la classe D si è registrata una distanza di 140 m. Al contrario, il metodo ad indici ha stimato una distanza di attenzione di circa 400 metri dal perimetro dello stabilimento, valore molto prossimo a quello ottenuto per la classe F con PHAST.

Si evidenzia tuttavia che i dati non sono direttamente confrontabili questo perché PHAST ha calcolato la dispersione dei fumi a partire dalla zona immediatamente esterna al magazzino, considerando le variabili dinamiche come ventilazione e condizioni ambientali (esempio temperatura, pressione e umidità), mentre il metodo ad indici ha fornito una stima statica a partire dal perimetro dello stabilimento, non considerando gli aspetti dinamici del fenomeno quali ad esempio l'interazione tra i fumi e l'ambiente circostante, il comportamento del materiale combustibile o della nube di fumi nel tempo.

In conclusione, il software PHAST si è rivelato uno strumento utile per la valutazione delle ricadute dei fumi tossici, grazie alla sua capacità di simulare scenari complessi e dinamici che considerano variabili come ventilazione, condizioni ambientali ed evoluzione temporale dell'incendio. Questo lo rende particolarmente utile per la pianificazione delle emergenze, poiché fornisce stime più precise e realistiche rispetto a metodi più statici. Al contrario, il Metodo ad indici, pur utile per identificare le aree di attenzione, presenta limitazioni significative, come la mancanza di considerazione per le variabili dinamiche e l'evoluzione temporale dell'incendio e sebbene possa essere impiegato come strumento preliminare, non è adatto per situazioni complesse.

Per quanto riguarda invece il software CFAST, va sottolineato che non è impiegato per scopi legati alla pianificazione delle emergenze, ma esso è utilizzato per studiare in dettaglio la dinamica dell'incendio all'interno di una struttura, con l'obiettivo di ottimizzare la progettazione dell'edificio e dei sistemi antincendio.

## 4.2 Incendio di magazzino contenente materiali in PVC

Come anticipato nell'introduzione di questo capitolo, per il caso studio in esame è stato assunto un magazzino con una superficie identica a quella del magazzino di pneumatici (108 m<sup>2</sup>), ma con una capacità di stoccaggio di 7680 kg di materiali in PVC, assimilabili a bottiglie da 500 ml, equivalenti a 200 pallet. Ogni pallet è stato ipotizzato composto da circa 64 scatole di bottiglie, suddivise in 4 strati, con 16 bottiglie per scatola e 12 per strato, ciascuna dal peso medio di circa 50 g; il potere calorifico inferiore del PVC è stato assunto pari a 16.4 MJ/kg (Quintiere, 1998).

### 4.2.1 Simulazione mediante PHAST

Analogamente, nella sezione "Warehouse" del software PHAST sono stati inseriti i valori di input relativi al magazzino di stoccaggio (superficie 108 m<sup>2</sup>, altezza 7 m, caratterizzato da pareti in mattone e una porta di 3x3 m<sup>2</sup>) e la formula, desunta da Billmeyer (1984), corrispondente a C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl, quale rappresentazione semplificata della struttura chimica della catena base del PVC.

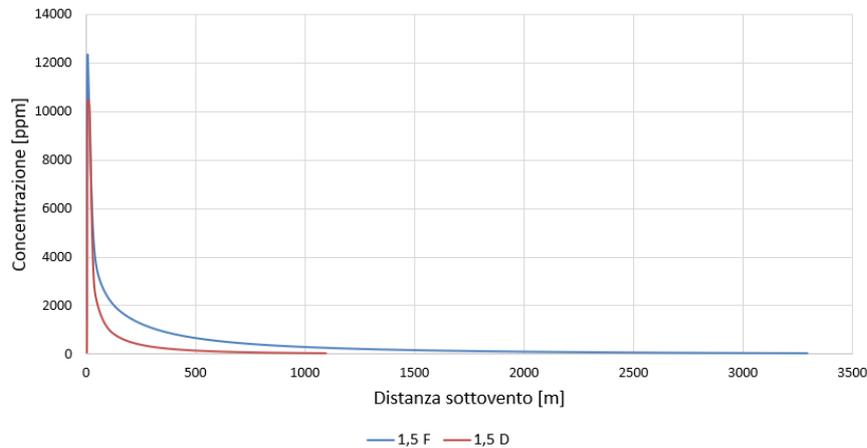
Per quanto riguarda le altre condizioni della simulazione sono stati lasciati i valori di default proposti dal PHAST: durata dell'incendio pari a 1800 s nonché la velocità del vento pari a 1.5 m/s.

Tra le informazioni fornite dal software sono elencati i prodotti della combustione completa dei materiali in PVC emessi dal capannone, che includono CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e HCl, generati a seguito di fenomeni di incendio derivanti dalla decomposizione termica di materiali aventi la formula chimica C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl. In particolare, le quantità di queste sostanze risultano essere pari a 10819 kg per il CO<sub>2</sub>, 2214,6 kg per l'H<sub>2</sub>O e 4485 kg per l'HCl. Nel contesto del presente lavoro di tesi, si è ritenuto opportuno focalizzarsi sulla formazione di HCl, considerato una sostanza di particolare rilevanza a causa delle sue caratteristiche tossiche, come desunto in numerosi studi di letteratura, tra cui quello di Yang et al. (2016) che identifica tale sostanza come uno dei principali inquinanti prodotti dalla decomposizione termica del polimero PVC. Tale considerazione trova conferma anche nei risultati della presente simulazione che ha evidenziato l'HCl come il secondo inquinante più prodotto durante un incendio di materiali in PVC, dopo il CO<sub>2</sub>. Pertanto, si è ritenuto appropriato simulare la dispersione dell'HCl, utilizzandolo come sostanza rappresentativa di un incendio di materiali in PVC, vista la sua significatività sia in termini di emissioni che per l'impatto tossicologico associato.

Per confrontare i casi studio sono state condotte due simulazioni comparative relative al caso reale e caso semplificato nella due classi di stabilità atmosferica 1.5 F, caratterizzata da scarsa turbolenza atmosferica, e 1.5 D, caratterizzata da maggiore turbolenza che favorisce una dispersione più rapida della nube tossica. Nel prosieguo, si riportano i risultati più significativi delle simulazioni, con particolare attenzione all'andamento della massima concentrazione della nube tossica, all'altezza della nube di fumo in vista laterale, alla letalità nello spazio dei prodotti di combustione. Si precisa che l'analisi è stata effettuata utilizzando una concentrazione soglia pari all'IDLH di 50 ppm per l'acido cloridrico (HCl), scelto come sostanza di riferimento per lo studio. Come descritto nel Capitolo 2, la sezione "Warehouse" del software PHAST non richiede l'inserimento della portata massica o volumetrica della sostanza tossica rilasciata tra i parametri di input ma permette di inserire la concentrazione di riferimento dell'inquinante, che, in questo caso, è stata assunta pari al valore dell'IDLH.

La Figura 4.8 mostra l'andamento della concentrazione massima della nube tossica generata dall'incendio all'esterno del magazzino, in funzione della distanza sottovento, nel caso semplificato. Sebbene i profili di concentrazione siano simili per entrambe le condizioni

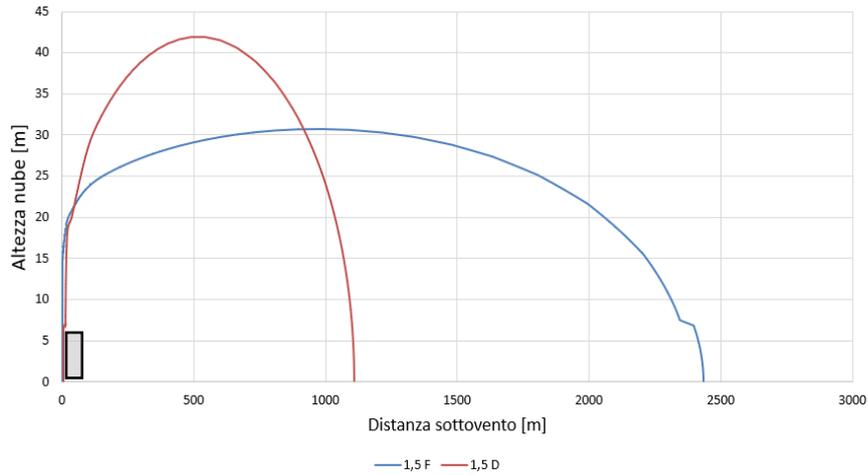
atmosferiche, si nota che nella classe F la nube raggiunge un picco di concentrazione più elevato, pari a circa 12000 ppm, subito all'uscita del capannone. Al contrario, nella classe D, il picco di concentrazione è inferiore, attestandosi intorno a 1000 ppm alla stessa distanza. Inoltre, la curva di concentrazione relativa alla classe D mostra una decrescita più rapida rispetto a quella della classe F, indicando una dispersione più efficace della nube tossica evidenziando il ruolo della stabilità atmosferica nella diffusione e concentrazione degli inquinanti rilasciati durante l'incendio.



**Figura 4.8.** Andamento della massima concentrazione della nube tossica nello spazio (riferite a 30 minuti) – caso reale e semplificato PVC (le curve sono sovrapposte).

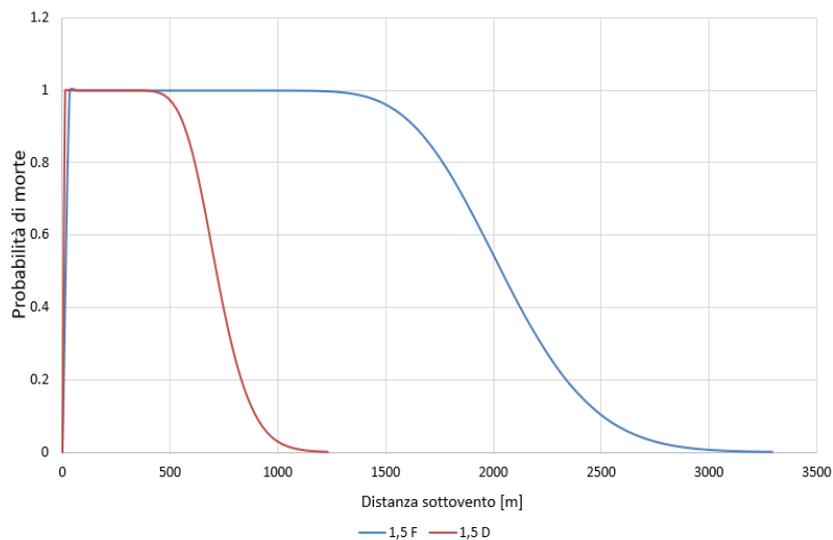
La Figura 4.9 mostra l'altezza della nube dei fumi in vista laterale per una concentrazione di 50 ppm, evidenziando come la stabilità atmosferica influenzi la distribuzione sia verticale che orizzontale della nube tossica nel caso semplificato. Nella classe F, caratterizzata da una turbolenza ridotta, la dispersione avviene con maggiore difficoltà, portando a un'estensione orizzontale più ampia della nube, che si propaga fino a circa 2,5 km oltre il capannone (rappresentato in figura da un rettangolo nero) e raggiunge un'altezza massima di circa 30 m dal suolo. Al contrario, nella classe D, dove la turbolenza è più intensa, la nube si disperde più rapidamente, riducendo la distanza orizzontale percorsa a circa 1,2 km dal capannone, ma raggiungendo un'altezza maggiore di circa 45 m.

Anche questi risultati confermano il ruolo della stabilità atmosferica nel modellare la forma e l'estensione della nube tossica. Nella classe F, la minore turbolenza favorisce una propagazione orizzontale più estesa, aumentando il rischio di contaminazione in zone più lontane dalla sorgente. Al contrario, nella classe D, la maggiore turbolenza atmosferica accelera la diluizione degli inquinanti, contenendo il loro impatto su un'area più ristretta.



**Figura 4.9.** Andamento dell'altezza della nube tossica nello spazio nella vista laterale (riferite a 50 ppm) – caso reale e semplificato PVC (le curve sono sovrapposte).

La Figura 4.10 illustra la distribuzione spaziale della letalità, espressa come frazione di probabilità di morte, derivata da modelli dose-risposta che considerano fattori come la durata dell'esposizione e la tossicità intrinseca della sostanza. In questo contesto, il parametro tossicologico di riferimento è l'LC50 (Concentrazione Letale al 50%), che rappresenta la concentrazione in grado di causare la morte del 50% degli individui esposti (per l'acido cloridrico tale valore è approssimativamente assunto pari a 300 ppm). Il grafico mostra l'andamento della letalità in funzione della distanza dalla sorgente, per un tempo di esposizione di 30 minuti; si osserva che la probabilità di morte raggiunge il valore massimo di 1 in prossimità del magazzino, per entrambe le condizioni atmosferiche. Questo comportamento è correlato alle concentrazioni di fumi riscontrate nelle vicinanze dell'area esterna al magazzino, che risultano pari a 12.000 ppm e 1.000 ppm rispettivamente per le condizioni atmosferiche 1,5 F e 1,5 D, valori che superano la soglia del LC50. Infatti, con l'aumentare della distanza dal magazzino, la probabilità di letalità diminuisce proporzionalmente, in linea con la riduzione della concentrazione della sostanza tossica dovuta al processo di diluizione atmosferica.



**Figura 4.10.** Andamento della letalità nello spazio riferite al valore di LC50 (30 minuti) – caso reale e semplificato PVC (le curve sono sovrapposte).

## 4.2.2 Modellazione dell'incendio mediante CFAST

In linea con le ipotesi adottate per il software PHAST, anche nella simulazione condotta con CFAST è stato considerato un incendio di materiali in PVC, mantenendo invariate sia le dimensioni del magazzino sia la massa del combustibile stoccato. È stata impostata una ventilazione naturale all'interno di un magazzino, e le condizioni ambientali sono state mantenute sui valori di default: temperatura interna ed esterna di 20°C, umidità relativa del 50% e pressione atmosferica di 1 atm.

Nella tabella 4.3 sono riportati i valori dei dati di input utilizzati nella simulazione e calcolati attraverso le formule del Capitolo 2 in particolare: la portata massima d'aria necessaria ( $\dot{m}_{aria,max}$ ) e la massima potenza rilasciata ( $HRR_{max,chiuso}$ ), la costante  $\alpha$  calcolata assumendo che la curva HRR nel tempo segua un profilo di tipo "ultrafast" (Quintiere, 1998) ed infine il tempo di picco ( $t_{picco,chiuso}$ ), utilizzando il valore di massima potenza termica precedentemente calcolato e il tempo nella fase stazionaria ( $t_{steady,chiuso}$ ).

**Tabella 4.3.** Parametri di input della simulazione sul software CFAST – caso magazzino contenente materiali in PVC.

<u>Parametri di input</u>	<u>Valore</u>
$\dot{m}_{aria,max}$ [kg/s]	7.79
$HRR_{max,chiuso}$ [kW]	23382.69
$\alpha$ [kW/s <sup>2</sup> ]	0.17
$t_{picco,chiuso}$ [s]	372.34
$t_{steady,chiuso}$ [s]	4444.44

Dall'analisi della tabella, si evidenzia che i valori relativi alla portata d'aria massima ( $\dot{m}_{aria,max}$ ) e alla potenza rilasciata ( $HRR_{max,chiuso}$ ) risultano invariati per tutti i materiali considerati; questo comportamento è giustificato dal fatto che, secondo le formule del capitolo 2, tali parametri dipendono dall'area dell'apertura ( $A_0$ ) e dalla sua altezza ( $h_0$ ), senza tenere conto delle specifiche proprietà termofisiche dei materiali coinvolti. Tuttavia, le caratteristiche intrinseche dei materiali influenzano direttamente il calcolo di  $t_{picco,chiuso}$  e  $t_{steady,chiuso}$ .

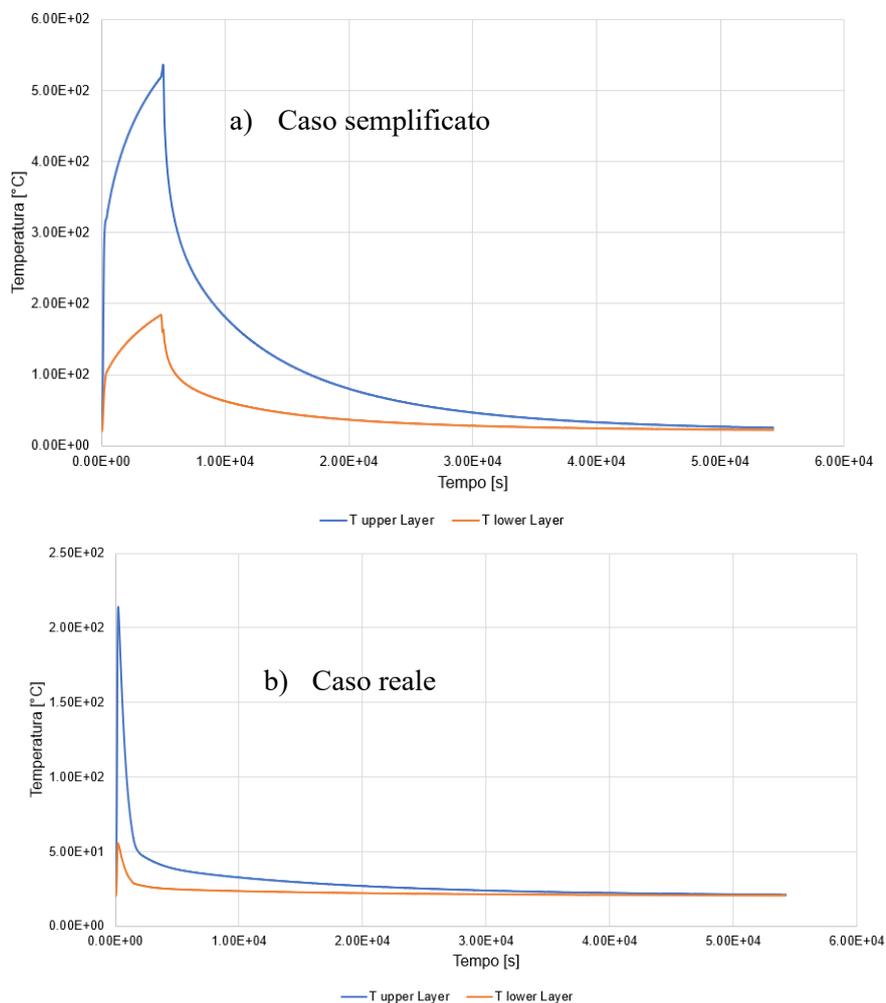
Dall'output della simulazione sono stati estratti i dati relativi all'andamento della portata massica dei fumi emessi, alla curva di rilascio termico (HRR) oltre ai valori della temperatura. Per garantire la coerenza con i grafici del caso del magazzino di pneumatici, i dati relativi alla temperatura sono stati analizzati su un intervallo temporale di 15 ore, mentre quelli riguardanti la portata massica dei fumi emessi, la pirolisi e la curva HRR sono stati considerati su una durata di circa 2 ore, poiché dopo tale intervallo i valori tendevano a stabilizzarsi su zero.

Analogamente alle simulazioni effettuate con il software PHAST, sono state condotte due simulazioni comparative relative al caso reale e caso semplificato di cui di seguito si riportano gli output più rappresentativi riguardanti l'andamento della temperatura, della portata massica della nube di fumi e della pirolisi, del HRR.

La Figura 4.11a mostra l'evoluzione della temperatura durante un incendio in un caso semplificato. Dal grafico si nota che nella parte superiore del magazzino (upper layer), la temperatura aumenta rapidamente fino a circa 550°C dopo circa un'ora e mezza, per poi diminuire gradualmente e stabilizzarsi alla temperatura ambiente dopo 15 ore. Nella parte inferiore del magazzino (lower layer), l'andamento della temperatura è simile ma meno pronunciato, con un picco massimo di circa 200°C, seguito da un progressivo calo fino ai valori ambientali, evidenziando la stratificazione termica e la distribuzione del calore all'interno del compartimento. Si osserva che i valori di temperatura massima stimati dal software CFAST

potrebbero essere sottostimati, in quanto risultano significativamente inferiori rispetto a quelli riportati in alcuni studi di letteratura, come ad esempio quello di Panagiotou et al. (1994), che indica temperature massime nell'ordine di  $1000^{\circ}\text{C}$  per l'incenerimento di materie plastiche, incluso il PVC. Tuttavia, è importante sottolineare che tali valori si riferiscono alla combustione completa, mentre nel caso specifico della simulazione in esame si verifica una combustione incompleta.

La Figura 4.11b invece, rappresenta l'andamento della temperatura durante un incendio simulato con la presenza di un sistema di protezione attivo (sprinkler), che si attiva a  $100^{\circ}\text{C}$ , per coerenza con il caso precedente. L'attivazione degli sprinkler modifica significativamente la distribuzione termica, con la temperatura nell'upper layer che raggiunge rapidamente i  $210^{\circ}\text{C}$ , ma viene ridotta a circa  $20^{\circ}\text{C}$  nell'arco di un'ora. Nel lower layer, si osserva un incremento termico più contenuto, con un picco di circa  $50^{\circ}\text{C}$ , seguito da un ritorno graduale ai valori ambientali.

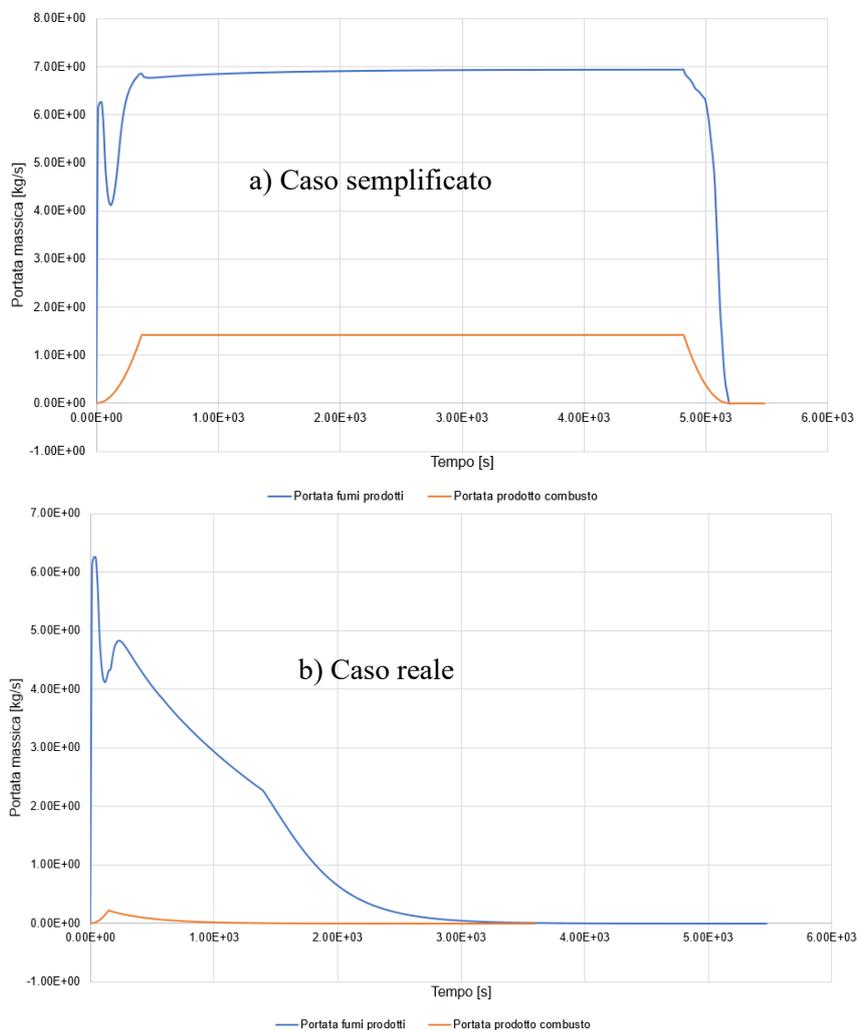


**Figura 4.11a. e Figura 4.11b.** Andamento della temperatura nel tempo – caso semplificato e caso reale PVC.

Analizzando la Figura 4.12a, che illustra l'andamento della portata massica dei fumi e dei prodotti di pirolisi nel caso semplificato, si osserva una rapida crescita iniziale della portata massica dei fumi, che raggiunge un picco di circa  $6 \text{ kg/s}$ , riflettendo la combustione veloce del materiale combustibile. Successivamente, la portata oscilla e si stabilizza a circa  $7 \text{ kg/s}$  entro  $500$  secondi, mantenendosi costante per circa  $90$  minuti, per poi diminuire rapidamente con

l'esaurirsi del materiale. La curva della pirolisi, che rappresenta la decomposizione termica del combustibile in assenza di ossigeno, mostra una crescita iniziale simile a quella della potenza termica, ma con una portata massica superiore, in quanto comprende sia i prodotti della pirolisi che quelli derivanti dall'interazione con l'ossigeno e altri fattori ambientali.

Nella Figura 4.12b, che rappresenta lo stesso scenario con il sistema di protezione attivo nel caso reale, si osserva un comportamento differente: la portata massica dei fumi raggiunge un picco simile a quello del caso semplificato, ma invece di stabilizzarsi o aumentare ulteriormente, la curva decresce gradualmente, scendendo a zero dopo circa un'ora. Questo andamento riflette l'efficacia del sistema di protezione nel limitare la produzione di fumi, abbassando le temperature e riducendo il materiale combustibile. La curva della pirolisi risulta pressoché nulla, indicando che l'incendio viene rapidamente controllato dal sistema di protezione, che limita la temperatura necessaria per la decomposizione termica del combustibile.

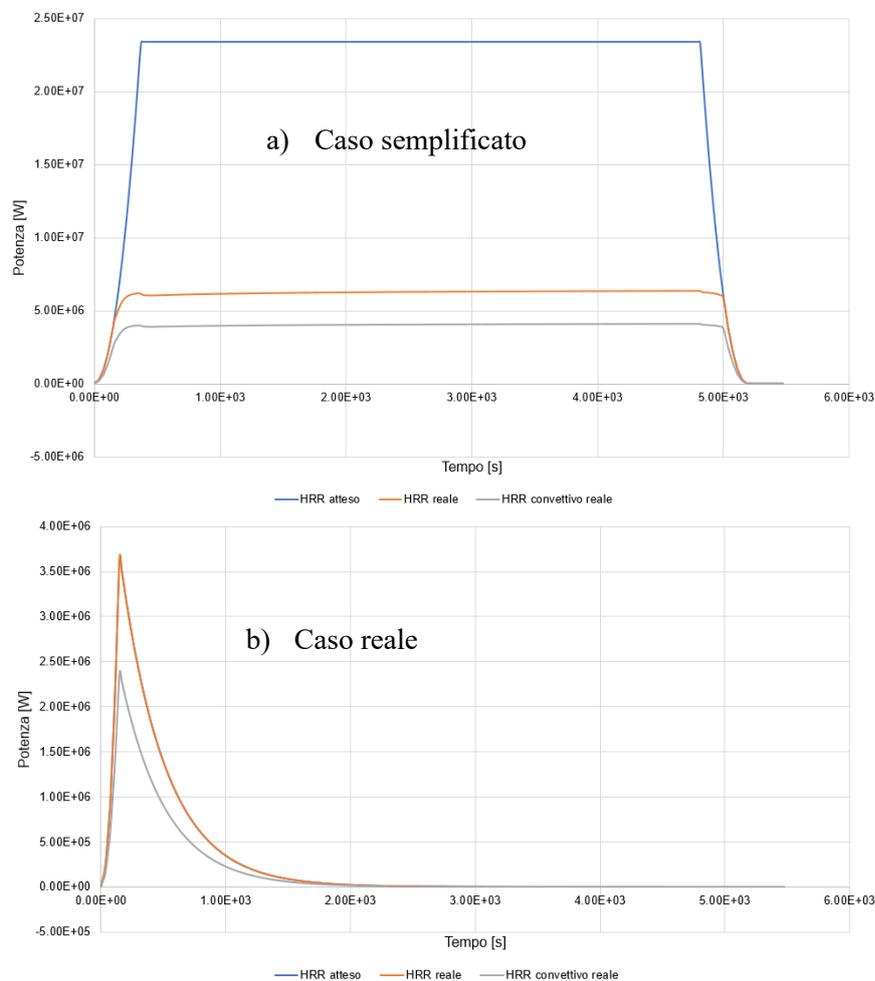


**Figura 4.12a. e Figura 4.12b.** Andamento della portata massica della nube e della pirolisi sviluppata - caso semplificato e caso reale PVC.

Nel grafico 4.13a, relativo al caso semplificato, si osserva che la curva HRR "reale", corrispondente alle condizioni sperimentali, segue un andamento simile a quello della curva HRR "ipotizzata", basata su previsioni teoriche, ma raggiunge un picco massimo di circa 5.6E6 kW in circa 10 minuti, mentre la curva teorica mostra un picco più elevato, allineato con i dati

di input (vedi Tabella 4.5). La differenza tra le due curve può essere attribuita al fatto che la curva "ipotizzata" si fonda su parametri teorici come il calore di combustione, la massa del combustibile e i tempi di pirolisi, che potrebbero non riflettere completamente il comportamento reale del materiale o le condizioni ambientali. Inoltre, nel grafico è presente anche la curva HRR "convettiva reale", che rappresenta l'energia rilasciata durante la combustione attraverso modalità diverse dalla convezione, come l'irraggiamento, e non contribuisce direttamente al flusso convettivo. Questa curva segue un andamento simile alle altre due, ma raggiunge un picco massimo inferiore, pari a  $4E6$  kW nello stesso intervallo di tempo.

Nel grafico 4.13b, che rappresenta il caso reale, le curve HRR "reale" e "ipotizzata" risultano praticamente sovrapponibili, evidenziando una buona corrispondenza tra i dati teorici e quelli sperimentali, con entrambi i picchi massimi che raggiungono  $3.6E6$  kW in soli 6 minuti. Successivamente, entrambe le curve mostrano una diminuzione con un andamento quadratico, azzerandosi dopo circa un'ora. Anche in questo caso, la curva HRR convettiva reale mantiene un andamento simile alle altre due, ma il suo picco massimo è inferiore, raggiungendo circa  $2.40E6$  kW nello stesso intervallo di tempo.



**Figura 4.13a. e Figura 4.13b.** Andamento delle curve HRR - caso semplificato e caso reale PVC.

### 4.2.3 Applicazione del Metodo ad indici (DPCM 27/08/2021)

Analogamente a quanto fatto per il caso studio relativo al magazzino di stoccaggio di pneumatici, sono stati esaminati due scenari utilizzando le formule presentate nel Capitolo 2, che fanno riferimento alle tabelle contenute nel Metodo ad Indici; anche in questo caso tale metodo è stato applicato al caso studio dei materiali in PVC nell'ipotesi di assumerli come materiali esausti. Per garantire un confronto adeguato con il caso precedente, è stato assunto un fattore di debito (FD) pari a 20, corrispondente alla presenza di un corso d'acqua nelle vicinanze dello stabilimento, mentre il fattore Pt non è stato preso in considerazione in quanto lo stabilimento oggetto dello studio non rappresenta un impianto di trattamento di rifiuti. Le due configurazioni esaminate, ovvero il caso reale e il caso semplificato, si differenziano principalmente in base alla presenza di misure di prevenzione, protezione e sicurezza, come descritto di seguito.

Per quanto riguarda il calcolo del carico d'incendio specifico (qf), secondo la formula 2.6, i risultati per entrambi i casi analizzati sono stati pari a 1166.22 MJ/m<sup>2</sup>. Tale valore è stato ottenuto considerando, oltre alla massa del materiale stoccato e al suo potere calorifico, anche l'area del magazzino. Inoltre, sono stati inclusi i fattori relativi alla partecipazione alla combustione e alla limitazione della partecipazione, entrambi impostati pari a 1.

Nel caso reale, per il calcolo del fattore di credito (FC), sono state prese in considerazione tutte le misure di prevenzione (Pre) e di protezione attiva (Proa) previste dal Metodo ad indici, attribuendo ad entrambe i punteggi massimi, rispettivamente pari a 175 e 200. Per quanto riguarda la security (Sec), sono state considerate tutte le voci previste dal metodo, ottenendo un punteggio complessivo di 70, che corrisponde alla somma dei punteggi individuali delle singole voci. Infine, per quanto riguarda la protezione passiva (Prop), è stata presa in considerazione come unica misura la presenza delle vasche di raccolta per le acque di spegnimento, alla quale è stato assegnato un punteggio pari a 30. Quindi l'indice di rischio IR risulta pari a 545, corrispondente ad un livello di rischio medio - basso al quale è associato una distanza di attenzione pari a 200 m (vedi Tabella 2.2).

Nel caso semplificato, secondo quanto riportato nel Metodo ad indici, per calcolare il fattore di credito FC per le misure di prevenzione (Pre) sono stati considerati gli obblighi previsti dal D.Lgs. 81/08 e dal piano per il mantenimento del livello di sicurezza antincendio, attribuendo un punteggio pari a 100, e per le misure di protezione attiva (Proa), sono stati contemplati gli idranti, sia interni che esterni, e gli estintori, attribuendo un punteggio pari a 100. Le misure di security (Sec) e di protezione passiva (Prop), invece, sono rimaste identiche a quelle analizzate nello scenario precedente. Da ciò deriva un indice di rischio IR complessivo pari a 720, corrispondente ad un livello di rischio medio, al quale è associato una distanza di attenzione pari a 300 m (vedi Tabella 2.2).

Nel seguito sono riportati i valori dei parametri considerati nei due casi studio (reale e semplificato):

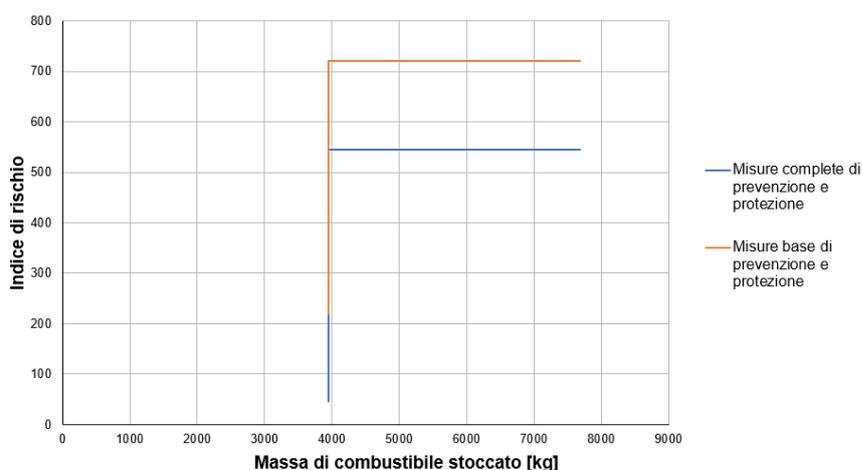
**Tabella 4.4.** Dati input e output Metodo ad Indici (DPCM 27/08/2021) - caso reale e caso semplificato magazzino contenente materiali in PVC.

Parametri	Caso reale	Caso semplificato
$q_f$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	1166.22	1166.22
Pr	1500	1500
Pt	-	-
FC = Pre + Proa + Prop + Sec	475 = 175+200+30+70	300 = 100+100+30+70
FD	20	20
<b>IR</b>	<b>545</b>	<b>720</b>
<b>Livello di rischio</b>	<b>Medio - basso</b>	<b>Medio</b>
<b>Distanza di attenzione</b>	<b>200 m</b>	<b>300 m</b>

In seguito, come nel caso precedente, si è proceduto a valutare la variazione dell'indice di rischio in funzione della variazione della massa, con l'obiettivo di ridurre il valore del carico d'incendio specifico a una fascia di rischio inferiore. Questa analisi ha mostrato che, in entrambi i casi, è stata necessaria una riduzione della massa fino a 3947 kg, corrispondente a una diminuzione del 48,6% della massa iniziale, per ottenere un carico d'incendio specifico che fosse compatibile con un livello di rischio basso.

Dalla Figura 4.14, si osserva che l'indice di rischio (Pr), in funzione della massa di materiale combustibile, presenta anche in questo caso un andamento a gradini. Nel caso reale, si osserva una significativa riduzione dell'indice di rischio incendio (IR) da 545 a 45, con un ulteriore abbassamento del livello di rischio, passando da medio-basso a basso (vedi Tabella 2.2). Al contrario, nel caso semplificato, l'indice di rischio mostra un andamento diverso, con una diminuzione più marcata da 720 a 220 (dallo stato di rischio medio a basso), pur mantenendo la stessa variazione della massa osservata nel caso reale. Questa riduzione su due livelli dell'indice di rischio dimostra che, anche in presenza di sistemi di protezione "base", è possibile ottenere un livello di rischio finale comparabile a quello che si ottiene con sistemi di prevenzione e protezione "completi". Infatti, con la stessa quantità di materiale combustibile, il livello di rischio risulta essere basso in entrambe le configurazioni analizzate.

-Anche in questo caso rimangono valide le criticità emerse nell'applicazione del Metodo ad Indici, riportare in conclusione al paragrafo 4.1.3 inerenti alla struttura del magazzino (aperto o



**Figura 4.14.** Analisi della variazione dell'indice di rischio in relazione alla massa stoccata PVC.

chiuso) e alla distinzione dei sistemi di estinzione automatici (acqua e schiuma) nonché alla reale ubicazione del magazzino coinvolto dall'incendio rispetto al perimetro dello stabilimento.

#### 4.2.4 Analisi dei risultati

In analogia al caso degli pneumatici per il confronto dei risultati ottenuti nel caso studio del magazzino contenente materiali in PVC, applicando il metodo ad indici e il software PHAST, si considera il caso semplificato che comporta delle distanze maggiori rispetto al caso reale. Da tale confronto emergono differenze significative nelle distanze raggiunte dalla nube di fumi tossici. In questo caso si osserva infatti che utilizzando la sezione "Warehouse" di PHAST sono state ottenute distanze di dispersione della nube variabili in base alla classe di stabilità atmosferica (per la classe F, più stabile, si ottengono distanze superiori alla classe D) maggiori di un ordine di grandezza rispetto al metodo ad indici. I due valori sono risultati significativamente incongruenti, evidenziando che le stime ottenute con i due metodi sono influenzate da approcci e parametri differenti, con il software PHAST che considera un'analisi più complessa e realistica rispetto al metodo ad indici, il quale si basa su una valutazione più generica e statica.

### 4.3 Incendio di magazzino contenente materiali in cartone

Come ultimo caso di studio è stato esaminato un magazzino destinato allo stoccaggio di materiali in cartone, mantenendo la stessa superficie del magazzino di pneumatici precedentemente analizzato (108 m<sup>2</sup>), ma con una configurazione di stoccaggio differente disposta sempre su 200 pallet; in particolare, ogni pallet è stato ipotizzato contenente quattro cartoni standard, disposti su cinque strati, per un totale di 20 cartoni, con un peso medio stimato di circa 100 g per unità e per un totale di 400 kg di stoccaggio complessivo. Per quanto riguarda le caratteristiche energetiche del materiale stoccato, è stato assunto come riferimento il potere calorifico inferiore della cellulosa, considerata un materiale analogo al cartone, con un valore pari a 16,1 MJ/kg secondo i dati riportati da Quintiere (1998).

#### 4.3.1 Simulazione mediante PHAST

Allo stesso modo, la simulazione nella sezione "Warehouse" del software PHAST è stata eseguita inserendo i valori di input relativi alla struttura di stoccaggio (superficie 108 m<sup>2</sup>, altezza 7 m, caratterizzato da pareti in mattone e una porta di 3x3 m<sup>2</sup>) e la formula C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>, desunta da Quintiere (1998), rappresentativa della struttura chimica del glucosio e quindi della cellulosa, assunto come costituente principale del cartone.

Anche per quest'ultimo caso per quanto riguarda le altre condizioni della simulazione sono stati lasciati i valori di default proposti dal PHAST: durata dell'incendio pari a 1800 s nonché la velocità del vento pari a 1.5 m/s.

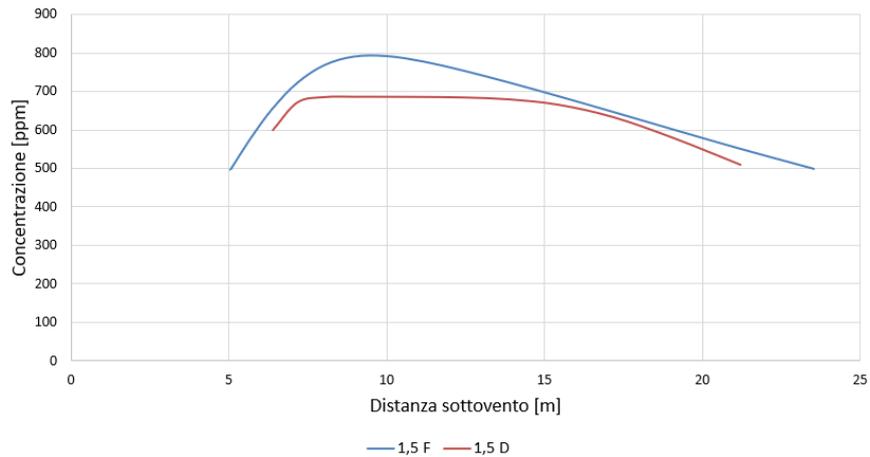
Tra le informazioni fornite dal modulo "Warehouse" del suddetto software sono indicati i prodotti della combustione completa in uscita dal capannone, tra cui CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e NO<sub>2</sub>, derivanti da fenomeni di incendio che coinvolgono materiali con la formula chimica C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>. Tuttavia, ai fini del presente lavoro di tesi, si è scelto di considerare la possibile formazione di altri prodotti con caratteristiche tossicologiche più rilevanti, che potrebbero svilupparsi in seguito a una combustione incompleta di materiali contenenti cartone, come ad esempio il benzene. Sebbene il benzene non rappresenti il principale prodotto di combustione del cartone, può essere uno degli inquinanti più pericolosi sotto il profilo tossicologico. Infatti, la combustione del

cartone, composto prevalentemente da cellulosa, porta principalmente alla formazione di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e vapore acqueo (H<sub>2</sub>O); tuttavia, in condizioni di combustione incompleta, possono formarsi anche sottoprodotti organici volatili, tra cui il benzene, che è noto per la sua elevata tossicità e per i potenziali effetti cancerogeni (Quintiere, 1998). Pertanto, si è ritenuto opportuno simulare la dispersione di tale sostanza come rappresentativa di un incendio di materiali in cartone, considerando le sue implicazioni tossicologiche.

Al fine di confrontare i diversi casi studio, sono state condotte due simulazioni comparative relative al caso reale e al caso semplificato, considerando due condizioni di stabilità atmosferica: 1.5 F, caratterizzata da una turbolenza atmosferica limitata (stabilità molto stabile), e 1.5 D, contraddistinta da una maggiore turbolenza che favorisce una dispersione più rapida della nube tossica (stabilità neutra). Nel presente lavoro vengono riportati e analizzati i risultati più significativi ottenuti dalle simulazioni, con particolare attenzione all'evoluzione della massima concentrazione della nube tossica, alla sua altezza in vista laterale, alla distribuzione spaziale della letalità dei prodotti di combustione generati. Si precisa che l'analisi è stata condotta utilizzando una concentrazione soglia corrispondente al IDLH di 500 ppm per benzene, assunto come sostanza di riferimento. Come descritto nel Capitolo 2, il modulo "Warehouse" del software PHAST, tra i parametri di input, non richiede l'inserimento della portata massica o volumetrica della sostanza tossica rilasciata ma consente di definire la concentrazione di riferimento dell'inquinante, che in questo caso è stata assunta pari al valore dell'IDLH.

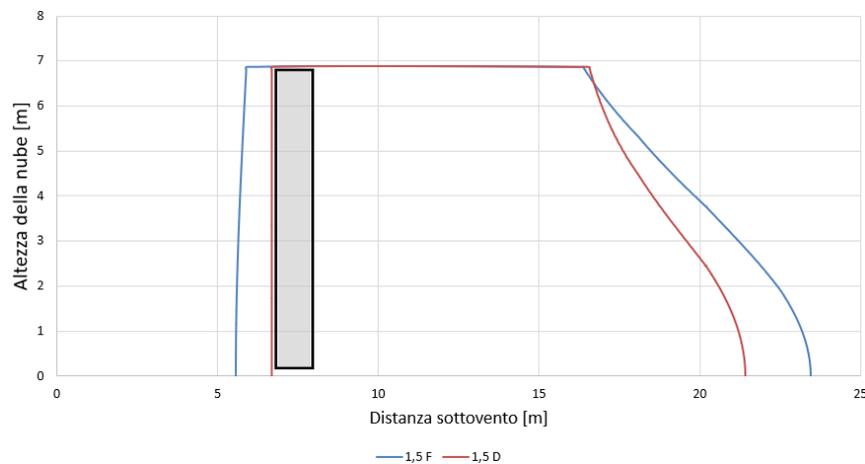
La Figura 4.15 illustra l'andamento della concentrazione massima della nube tossica generata dall'incendio all'esterno del magazzino in relazione alla distanza sottovento, nel caso semplificato. Sebbene i profili di concentrazione risultino qualitativamente simili per entrambe le condizioni atmosferiche analizzate, si osserva un comportamento differente rispetto agli incendi che coinvolgono i precedenti materiali studiati (pneumatici e PVC).

Nel caso specifico dell'incendio di cartone, la stabilità atmosferica influisce significativamente sulla dispersione degli inquinanti. In particolare, per la classe F, caratterizzata da una turbolenza ridotta, la nube tossica raggiunge un picco di concentrazione leggermente più elevato, pari a circa 800 ppm, a una distanza di 5 m dall'uscita del magazzino; al contrario, nella classe D, in cui la turbolenza atmosferica è maggiore e favorisce una più rapida miscelazione dei gas, il picco di concentrazione risulta inferiore, attestandosi attorno a 700 ppm alla stessa distanza. Un aspetto importante è rappresentato dalla velocità di decadimento della concentrazione, dove la curva relativa alla classe F evidenzia una diminuzione più marcata rispetto a quella della classe D, suggerendo che, nonostante il picco iniziale più elevato, la dispersione della nube avviene in modo relativamente più rapido rispetto a condizioni di maggiore turbolenza. In entrambi i casi, la nube tossica inizia con una concentrazione compresa tra 500 e 600 ppm, rispettivamente per le classi F e D.



**Figura 4.15.** Andamento della massima concentrazione della nube tossica nello spazio (riferite a 30 minuti) – caso reale e semplificato cartone (le curve sono sovrapposte).

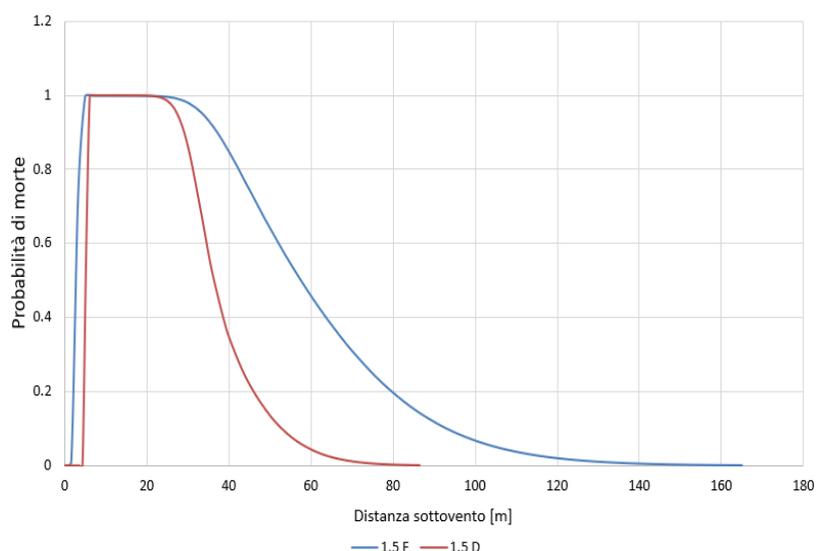
La Figura 4.16 illustra l'andamento dell'altezza della nube dei fumi in vista laterale, in corrispondenza di una concentrazione di 500 ppm. Questa rappresentazione evidenzia come la stabilità atmosferica influisca sulla distribuzione della nube, sia dal punto di vista verticale che orizzontale, nel contesto del caso semplificato. In entrambi gli scenari, per le classi F e D, la dispersione della nube appare simile, poiché in entrambi i casi l'estensione orizzontale della nube raggiunge circa 25 metri oltre il capannone (rettangolo nero in figura). Inoltre, la massima altezza della nube non supera i 7 metri dal suolo, indicando che, pur in presenza di differenti livelli di turbolenza atmosferica, la stabilità atmosferica sembra avere un impatto minimo sulla dimensione verticale e orizzontale della nube tossica in questo scenario semplificato. Successivamente, è stata ripetuta la simulazione per il caso reale, mantenendo invariate le stesse condizioni atmosferiche. I risultati ottenuti hanno mostrato che la configurazione della nube di fumo all'esterno del magazzino rimane sostanzialmente invariata rispetto al caso semplificato. In effetti, sia l'altezza massima raggiunta dalla nube, sia la distanza orizzontale percorsa, non presentano variazioni significative tra i due scenari considerati, suggerendo che, in queste circostanze, le condizioni atmosferiche non hanno un effetto rilevante sulla dispersione della nube tossica, sia nel caso semplificato che in quello reale.



**Figura 4.16.** Andamento dell'altezza della nube tossica nello spazio nella vista laterale (riferite a 500 ppm) – caso reale e semplificato cartone (le curve sono sovrapposte).

Il software PHAST fornisce un grafico che illustra l'andamento della letalità nello spazio, espressa come probabilità di morte, utilizzando modelli dose-risposta che tengono conto di parametri come la durata dell'esposizione e la tossicità specifica della sostanza. In questo contesto, il parametro tossicologico di riferimento adottato è il valore LC50 (Lethal Concentration 50%), che rappresenta la concentrazione capace di causare la morte del 50% dei soggetti esposti, e nel caso del benzene, tale valore corrisponde a circa 13700 ppm.

Nella Figura 4.17 è illustrato l'andamento della probabilità di letalità in funzione della distanza dalla sorgente di emissione, riferito a un tempo di esposizione di 30 minuti. Il grafico evidenzia come la probabilità di morte raggiunga il valore massimo di 1 in prossimità del magazzino per entrambe le condizioni atmosferiche, dimostrando che le concentrazioni di fumi rilevate nelle immediate vicinanze dell'area esterna al magazzino siano pari a 800 ppm e 700 ppm rispettivamente per le condizioni atmosferiche 1,5 F e 1,5 D, valori che risultano essere significativamente inferiori al valore di LC50 per il benzene. A mano a mano che aumenta la distanza dal magazzino, la probabilità di letalità diminuisce, fenomeno che è strettamente correlato alla riduzione della concentrazione della sostanza tossica dovuta al processo di diluizione dell'inquinante nell'ambiente circostante. In entrambi i casi, reali o semplificati, non si osservano differenze significative nelle simulazioni, a conferma della coerenza tra i due modelli utilizzati.



**Figura 4.17.** Andamento della letalità nello spazio riferite al valore di LC50 (30 minuti) – caso reale e semplificato cartone (le curve sono sovrapposte).

### 4.3.2 Modellazione dell'incendio mediante CFAST

In accordo con le ipotesi adottate per il software PHAST, anche nella simulazione effettuata con CFAST è stato considerato un incendio di cartone, mantenendo costanti sia le dimensioni del magazzino sia la quantità di combustibile stoccato. È stata inoltre implementata una ventilazione naturale all'interno del magazzino, mentre le condizioni ambientali sono state fissate ai valori di default, con una temperatura interna ed esterna di 20°C, un'umidità relativa del 50% e una pressione atmosferica di 1 atm.

I valori dei parametri di input utilizzati nella simulazione, riportati nella Tabella 4.5, sono stati calcolati applicando le formule del Capitolo 2 e includono la portata massima d'aria richiesta ( $\dot{m}_{aria,max}$ ), la massima potenza rilasciata ( $HRR_{max, chiuso}$ ), la costante  $\alpha$  calcolata assumendo

che la curva HRR nel tempo segua un profilo di tipo “ultrafast” (Quintiere, 1998) ed infine il tempo di picco ( $t_{picco, chiuso}$ ), utilizzando il valore di massima potenza termica precedentemente calcolato e il tempo nella fase stazionaria ( $t_{steady, chiuso}$ ).

**Tabella 4.5.** Parametri di input della simulazione sul software CFAST– caso magazzino contenente materiali in cartone.

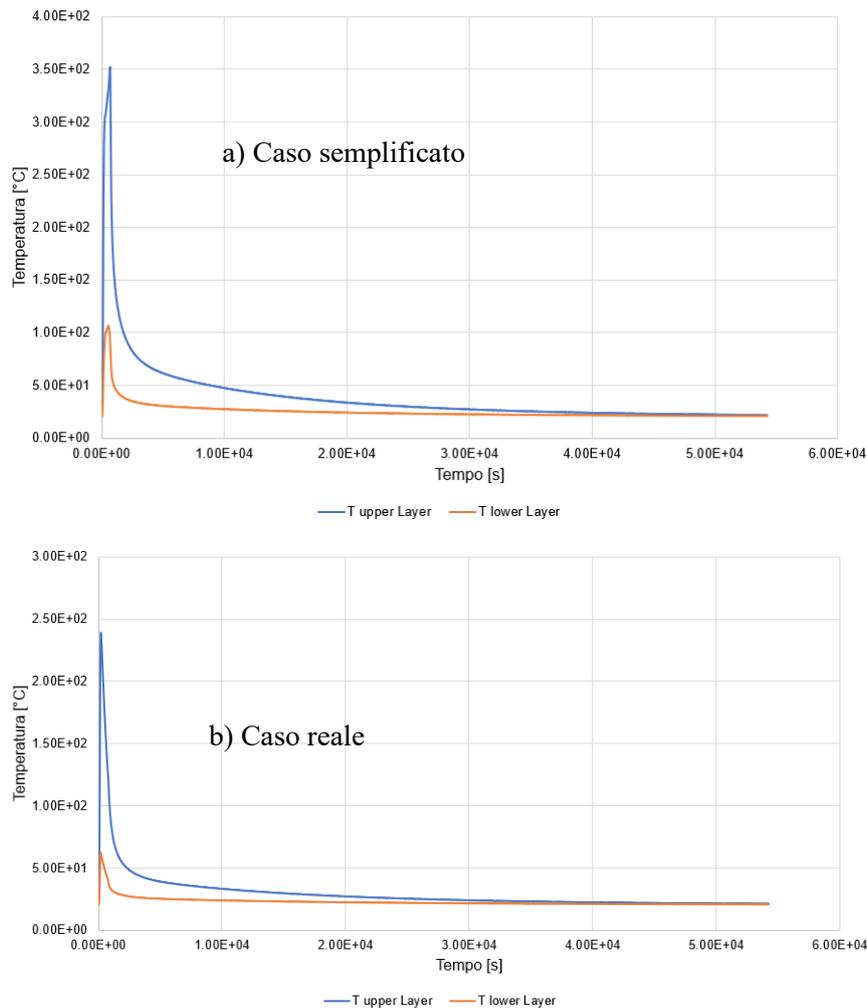
Parametri di input	Valore
$\dot{m}_{aria,max}$ [kg/s]	7.79
$HRR_{max, chiuso}$ [kW]	23382.69
$\alpha$ [kW/s <sup>2</sup> ]	0.30
$t_{picco, chiuso}$ [s]	280.46
$t_{steady, chiuso}$ [s]	264.55

Anche in questo caso dall'analisi della tabella, si evidenzia che i valori relativi alla portata d'aria massima ( $\dot{m}_{aria,max}$ ) e alla massima potenza rilasciata ( $HRR_{max, chiuso}$ ) risultano invariati per tutti i materiali considerati.

Dall'analisi dei risultati della simulazione sono stati estratti i dati relativi alla portata massica dei fumi emessi, alla curva di rilascio termico (HRR) e alla temperatura. Per garantire uniformità con i grafici relativi al caso del magazzino di pneumatici, l'andamento della temperatura è stato esaminato su un intervallo temporale di 15 ore, mentre i parametri riguardanti la portata massica dei fumi emessi, il processo di pirolisi e l'HRR sono stati analizzati per un periodo di circa 30 minuti, poiché oltre tale soglia i valori tendevano a stabilizzarsi intorno allo zero.

Analogamente alle simulazioni effettuate con il software PHAST, sono state condotte due simulazioni comparative relative al caso reale e caso semplificato di cui di seguito si riportano gli output più rappresentativi riguardanti l'andamento della temperatura, della portata massica della nube di fumi e della pirolisi, del HRR.

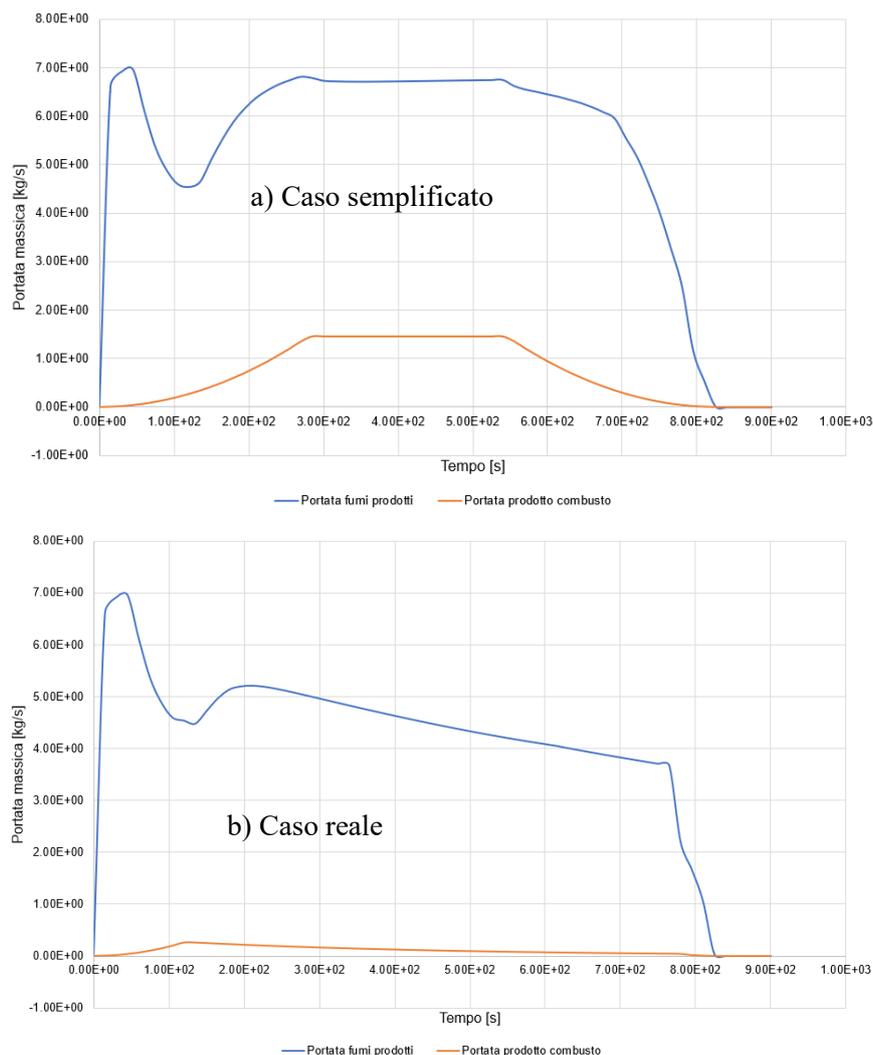
Le Figure 4.18a e 4.18b rappresentano l'andamento della temperatura nel tempo durante un incendio nei due scenari analizzati, ovvero il caso semplificato e quello reale. Da entrambi i grafici emerge un comportamento simile, con la temperatura che, nella parte superiore del magazzino (upper layer), raggiunge un picco di circa 350°C nel caso semplificato e 250°C nel caso reale quasi immediatamente, per poi diminuire progressivamente fino a stabilizzarsi ai valori ambientali in meno di un'ora. Anche nella parte inferiore del magazzino (lower layer) si osserva un andamento analogo, seppur con variazioni meno marcate: la temperatura massima registrata è di circa 100°C nel caso semplificato e 50°C in quello reale, seguita da un graduale ritorno alla temperatura iniziale. Questo comportamento evidenzia chiaramente la stratificazione termica e la distribuzione del calore all'interno del compartimento, confermando una maggiore concentrazione di calore negli strati superiori rispetto a quelli inferiori.



**Figura 4.18a.** e **Figura 4.18b.** Andamento della temperatura nel tempo – caso semplificato e caso reale cartone.

La Figura 4.19a mostra l'andamento della portata massica dei fumi e della pirolisi nel caso semplificato, evidenziando un rapido incremento della portata massica dei fumi fino a un picco di 7 kg/s, dovuto alla combustione intensa del materiale. Dopo un'oscillazione iniziale, il valore si stabilizza entro 300 secondi, rimanendo costante per circa 6 minuti, per poi diminuire rapidamente con l'esaurimento del combustibile. La curva della pirolisi, indicativa della decomposizione termica in assenza di ossigeno, segue un andamento simile alla potenza termica, ma la portata massica dei fumi risulta superiore poiché include anche i prodotti della combustione in presenza di ossigeno.

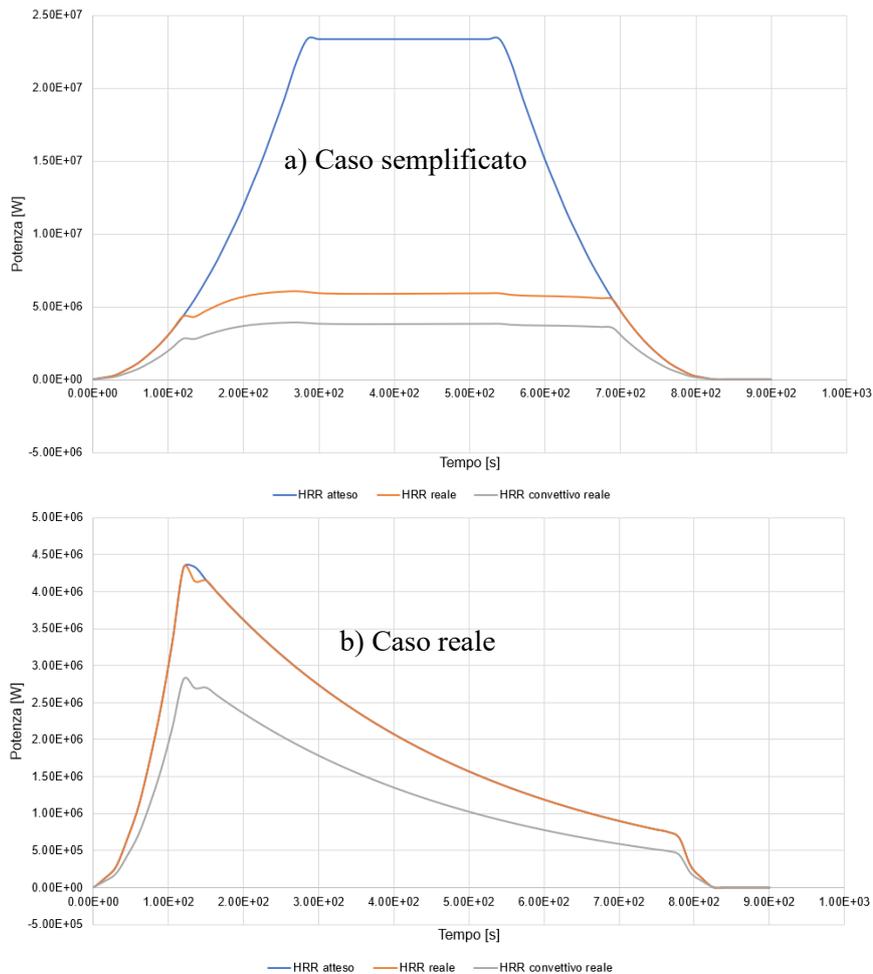
La Figura 4.19b, relativa al caso reale con un sistema di protezione attivo, evidenzia un comportamento analogo, con un picco iniziale simile al caso semplificato. Tuttavia, la portata subisce una lieve oscillazione prima di calare gradualmente fino a 10 minuti, per poi azzerarsi rapidamente. Questo dimostra l'efficacia del sistema di protezione nel ridurre la produzione di fumi attraverso l'abbassamento delle temperature e la limitazione del combustibile disponibile. La curva della pirolisi è quasi assente, confermando che l'incendio viene rapidamente contenuto, impedendo il raggiungimento delle temperature necessarie per la decomposizione termica.



**Figura 4.19a. e Figura 4.19b.** Andamento della portata massica della nube e della pirolisi sviluppata - caso semplificato e caso reale cartone.

Nel grafico 4.20a, relativo al caso semplificato, la curva HRR "reale", basata su dati sperimentali, segue un andamento simile ma meno accentuato rispetto alla curva HRR "ipotizzata", derivata da previsioni teoriche. Il picco massimo della curva reale è di  $5E6$  kW in 5 minuti, mentre quella teorica raggiunge un valore più elevato, coerente con i parametri di input (Tabella 4.8). La discrepanza è dovuta al fatto che la curva ipotizzata si basa su parametri teorici, che possono non rispecchiare perfettamente il comportamento reale del combustibile e le condizioni ambientali. Inoltre, la curva HRR "convettiva reale", che rappresenta l'energia rilasciata per irraggiamento e altri meccanismi diversi dalla convezione, segue un andamento simile alla HRR reale, ma con un picco inferiore.

Nel grafico 4.20b, relativo al caso reale, le curve HRR "reale" e "ipotizzata" risultano quasi sovrapponibili, indicando una buona coerenza tra dati teorici e sperimentali. Entrambe raggiungono un picco massimo di  $4.5E6$  kW in 5 minuti, per poi decrescere con andamento quadratico fino ad azzerarsi in circa un'ora. Anche in questo caso, la curva HRR convettiva reale segue un andamento analogo, ma con un picco inferiore di circa  $2.8E6$  kW.



**Figura 4.20a. e Figura 4.20b.** Andamento delle curve HRR - caso semplificato e caso reale cartone.

### 4.3.3 Applicazione del Metodo ad indici (DPCM 27/08/2021)

Come nel caso dello studio relativo al magazzino di stoccaggio di pneumatici, sono stati analizzati due scenari utilizzando le formule presentate nel Capitolo 2, che fanno riferimento alle tabelle del Metodo ad Indici; anche in questo caso tale metodo è stato applicato al caso studio dei materiali in cartone nell'ipotesi di assumerli come materiali esausti.

Per mantenere una coerenza con il caso precedente, è stato adottato un fattore di debito (FD) pari a 20, mentre il fattore Pt è stato escluso, come dettagliato nei paragrafi 4.1.3 e 4.2.3. Le due configurazioni analizzate, ossia il caso reale e quello semplificato, si distinguono principalmente per la presenza di diverse misure di prevenzione, protezione e sicurezza, come di seguito illustrato.

Per quanto riguarda il calcolo del carico d'incendio specifico ( $q_f$ ), secondo la formula 2.6, i risultati per entrambi i casi analizzati sono stati pari a  $59 \text{ MJ/m}^2$ , considerando oltre alla massa del materiale stoccato e al suo potere calorifico anche l'area del magazzino. Inoltre, sono stati inclusi i fattori relativi alla partecipazione alla combustione e alla limitazione della partecipazione, entrambi impostati pari a 1.

Nel caso reale, per il calcolo del fattore di credito (FC), sono state considerate tutte le misure di prevenzione (Pre) e protezione attiva (Proa) previste dal metodo ad indici, con i punteggi massimi di 175 e 200 rispettivamente. La security (Sec) è stata valutata attribuendo un punteggio complessivo di 70, derivante dalla somma dei punteggi delle singole voci. Per la

protezione passiva (Prop), è stata considerata solo la presenza di vasche di raccolta per le acque di spegnimento, con un punteggio di 30. Nel caso semplificato, sono stati considerati gli obblighi del D.Lgs. 81/08 e il piano per il mantenimento della sicurezza antincendio per il calcolo del fattore di credito FC per le misure di prevenzione (Pre), con un punteggio di 100. Per le misure di protezione attiva (Proa), sono stati inclusi gli idranti e gli estintori, con un punteggio di 100. Le misure di security (Sec) e protezione passiva (Prop) sono rimaste invariate rispetto al caso reale.

In entrambi i casi analizzati, l'indice di rischio (IR) ha assunto un valore pari a 45 per il caso reale, corrispondente a un livello di rischio basso, e di 220 per il caso semplificato, che, sebbene superiore, ha comunque indicato un livello di rischio basso. Entrambi i valori sono associati a una distanza di attenzione di 200 m, come riportato nella Tabella 2. In considerazione di questi risultati, non è stato necessario intraprendere alcuna azione per ridurre la massa, poiché l'indice di rischio, già mantenuto su un livello basso, non richiedeva ulteriori variazioni per abbassarlo.

Nel seguito sono riportati i valori dei parametri considerati nei due casi studio (reale e semplificato):

**Tabella 4.6.** Dati input e output Metodo ad Indici (DPCM 27/08/2021) - caso reale e caso semplificato magazzino contenente materiali in cartone.

<u>Parametri</u>	<u>Caso reale</u>	<u>Caso semplificato</u>
$q_f$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	59	59
Pr	1500	1500
Pt	-	-
FC = Pre + Proa + Prop + Sec	475 = 175+200+30+70	300 = 100+100+30+70
FD	20	20
<b>IR</b>	<b>45</b>	<b>220</b>
<b>Livello di rischio</b>	<b>Basso</b>	<b>Basso</b>
<b>Distanza di attenzione</b>	<b>200 m</b>	<b>200 m</b>

#### 4.3.4 Analisi dei risultati

Nel confronto dei risultati ottenuti dallo studio dell'incendio di un magazzino contenente materiali in cartone, sono state esaminate le distanze di dispersione della nube di fumi generate, utilizzando sia il Metodo ad indici che il modulo “Warehouse” del software PHAST, che peraltro danno entrambi risultati analoghi per il caso semplificato e per quello reale. In particolare, il software PHAST ha fornito distanze di dispersione della nube molto ridotte, pari a circa 25 metri per entrambe le classi F e D, mentre il metodo ad indici ha stimato una distanza di attenzione molto più elevata, pari a 200 metri dal perimetro dello stabilimento. Si precisa che tale differenza pari ad un ordine di grandezza è giustificabile dal fatto che il metodo ad indici ha come finalità definire un'area di gestione dell'emergenza, mentre con il PHAST si stimano l'estensione di aree di potenziale danno.



## 5. Conclusioni

L'obiettivo della presente tesi è stato confrontare i risultati ottenuti dal Metodo ad indici, di cui al DPCM del 27/08/2021 per la classificazione del rischio incendio negli impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti, applicato a tre materiali diversi, con quelli derivanti dalle simulazioni di un incendio degli stessi effettuate con il modulo "Warehouse" del software PHAST.

Per lo studio dei fenomeni di incendio in ambiente confinato sono stati quindi applicati i metodi e gli strumenti illustrati al capitolo 2, scegliendo come caso studio un magazzino di stoccaggio di cui sono state mantenute costanti le caratteristiche strutturali (superficie, altezza e aperture) e la capacità di stoccaggio corrispondente a 200 pallet, variando i materiali al suo interno, scelti di tre diverse tipologie (pneumatici, PVC e cartone).

In relazione al mio tirocinio curriculare e alla successiva frequenza per tesi, effettuati presso l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale, è stato possibile utilizzare il software PHAST, della società DNV, in particolare il modulo specifico "Warehouse" per effettuare le simulazioni della dispersione dei fumi di combustione all'esterno di un magazzino. Per completare gli approfondimenti si è ritenuto significativo applicare un secondo software per studiare la dinamica dell'incendio all'interno di un magazzino ed è stato scelto il software CFAST, della società NIST.

I parametri di input di quest'ultimo sono stati valorizzati applicando le formule proposte nel testo *Principles of fire behavior* del Quintiere (1998), che comprendono la massima potenza termica emessa (HRRmax), che dipende dalla geometria del magazzino, e il tempo di picco, che varia in funzione dei materiali coinvolti, analogamente al tempo nella fase stazionaria (si precisa che il tempo di decrescita dell'incendio è assunto pari al tempo di picco). Come output il software ha restituito l'andamento nel tempo della portata massica dei fumi emessi, della massa totale dei prodotti di combustione e della curva di rilascio termico nonché della temperatura.

Relativamente al software PHAST, sono stati selezionati i prodotti di combustione più tossici per ciascun materiale (acido cianidrico per gli pneumatici, acido cloridrico per il PVC e benzene per il cartone), per i quali è stata inserita la concentrazione di riferimento assunta pari al valore dell'IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) e ne è stata simulata la dispersione in funzione della distanza dal magazzino. Tra gli esiti delle simulazioni, quelli più rappresentativi, ai fini del presente studio, sono quelli espressi in termini di massima concentrazione dell'inquinante in funzione della distanza dalla sorgente di emissione (assumendo come tempo di riferimento 30 minuti).

Si precisa che non è stato possibile dare pieno seguito all'intento iniziale di utilizzare in modo combinato il software CFAST e il modulo "Warehouse" del software PHAST per caratterizzare le conseguenze di un incendio rispettivamente all'interno e all'esterno di un magazzino, in quanto tra i parametri di input richiesti dal modulo "Warehouse" non è possibile inserire la portata massica o volumetrica dei fumi tossici di combustione, che risulta essere uno degli output del CFAST. Pertanto, uno sviluppo futuro del presente lavoro potrebbe consistere nel valutare la fattibilità di utilizzare gli output del CFAST e, in particolare, l'andamento nel tempo della portata massica dei fumi di combustione emessi come input di altre funzionalità del software PHAST che potrebbero essere in grado di effettuare lo studio della dispersione dei fumi tossici di combustione.

È stata infine applicata la terza metodologia illustrata nel capitolo 2, relativa all'applicazione di un metodo speditivo, approvato con DPCM 27/08/2021, per la stima di una "distanza di attenzione" finalizzata alla predisposizione dei Piani di Emergenza Esterni (PEE) agli impianti di stoccaggio e trattamento dei rifiuti, come previsto dalla Legge 132/2018. Il DPCM propone un metodo ad indici per la classificazione del rischio incendio, che dipende principalmente dal carico di incendio dei materiali coinvolti, in quanto per tali impianti la normativa non impone analisi di rischio di tipo ingegneristico con l'applicazione di software numerici (quale ad esempio il PHAST); quest'ultima è infatti la principale differenza rispetto agli stabilimenti a rischio di incidente rilevante, a cui si è ispirata la Legge 132/2018 nel prevedere i PEE.

È stato quindi effettuato un confronto tra i risultati ottenuti dal metodo speditivo, applicato ai tre materiali in esame (pneumatici, PVC e cartone), con quelli derivanti dalle simulazioni di un incendio degli stessi effettuate con il modulo "Warehouse" del software PHAST. Dal confronto è emerso che nel caso degli pneumatici i risultati sono convergenti, in quanto determinano stime simili (circa 400 m), mentre per il PVC i risultati divergono in quanto il PHAST restituisce distanze sovrastimate rispetto al metodo ad indici. Viceversa, per il caso del cartone il metodo ad indici restituisce una distanza di attenzione che è di un ordine di grandezza superiore ai risultati ottenuti con il PHAST, che si giustifica considerando che il metodo ad indici ha come finalità di definire un'area di gestione dell'emergenza che è giusto che sia conservativamente maggiore della stima dell'estensione delle aree di potenziale danno stimate con il PHAST.



## 6. Figure

<b>Figura 2.3.</b> Schermate di input del software PHAST.	9
<b>Figura 4.2.</b> Schermate di input del software CFAST.	10
<b>Figura 3.1.</b> Schermate applicativo interno di Arpa Piemonte “Controlli non programmati”.	18
<b>Figura 3.2a.</b> Numero incendi nei quattro Dipartimenti territoriali nel periodo marzo 2014 - ottobre 2024	20
<b>Figura 3.2b.</b> Numero incendi totali nei quattro Dipartimenti territoriali.	20
<b>Figura 3.3.</b> Focus sul numero di incendi nelle province, ad esclusione di Torino e Cuneo, tra marzo 2014 e ottobre 2024.	21
<b>Figura 3.4a.</b> Attività coinvolte nei casi di incendi studiati.	21
<b>Figura 3.4b.</b> Attività coinvolte nei casi di incendi studiati ad esclusione di “altro” e “sconosciuto”.	21
<b>Figura 3.5.</b> Percentuale di incendi verificatisi nelle diverse tipologie di attività, esclusa la categoria "altro", per ciascuna provincia.	22
<b>Figura 3.6.</b> Focus sul numero di incendi che hanno coinvolto stabilimenti industriali e impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti ripartiti per provincia.	23
<b>Figura 3.7a.</b> Combustibili coinvolti negli incendi analizzati.	23
<b>Figura 3.7b.</b> Ente segnalante degli incendi analizzati.	23
<b>Figura 3.8.</b> Sostanze campionate da Arpa Piemonte in fase emergenziale (ARPA Piemonte, 2023).	25
<b>Figura 4.1.</b> Andamento della massima concentrazione della nube tossica nello spazio (riferite a 30 minuti) – caso reale e semplificato pneumatici (le curve sono sovrapposte).	29
<b>Figura 4.2.</b> Andamento dell'altezza della nube tossica nello spazio nella vista laterale (riferite a 50 ppm) – caso reale e semplificato pneumatici (le curve sono sovrapposte).	30
<b>Figura 4.3.</b> Andamento della letalità nello spazio riferite al valore di LC50 (30 minuti) – caso reale e semplificato pneumatici (le curve sono sovrapposte).	30
<b>Figura 4.4a. e Figura 4.4b.</b> Andamento della temperatura nel tempo – caso semplificato e caso reale pneumatici.	32
<b>Figura 4.5a. e Figura 4.5b.</b> Andamento della portata massica della nube e della pirolisi sviluppata - caso semplificato e caso reale pneumatici.	34
<b>Figura 4.6a. e Figura 4.6b.</b> Andamento delle curve HRR - caso semplificato e caso reale pneumatici.	35
<b>Figura 4.7.</b> Analisi della variazione dell'indice di rischio in relazione alla massa stoccata – caso studio magazzino pneumatici.	37
<b>Figura 4.8.</b> Andamento della massima concentrazione della nube tossica nello spazio (riferite a 30 minuti) – caso reale e semplificato PVC (le curve sono sovrapposte).	40

<b>Figura 4.9.</b> Andamento dell'altezza della nube tossica nello spazio nella vista laterale (riferite a 50 ppm) – caso reale e semplificato PVC (le curve sono sovrapposte).	41
<b>Figura 4.10.</b> Andamento della letalità nello spazio riferite al valore di LC50 (30 minuti) – caso reale e semplificato PVC (le curve sono sovrapposte).	41
<b>Figura 4.11a. e Figura 4.11b.</b> Andamento della temperatura nel tempo – caso semplificato e caso reale PVC.	43
<b>Figura 4.12a. e Figura 4.12b.</b> Andamento della portata massica della nube e della pirolisi sviluppata - caso semplificato e caso reale PVC.	44
<b>Figura 4.13a. e Figura 4.13b.</b> Andamento delle curve HRR - caso semplificato e caso reale PVC.	45
<b>Figura 4.14.</b> Analisi della variazione dell'indice di rischio in relazione alla massa stoccata PVC.	47
<b>Figura 4.15.</b> Andamento della massima concentrazione della nube tossica nello spazio (riferite a 30 minuti) – caso reale e semplificato cartone (le curve sono sovrapposte).	50
<b>Figura 4.16.</b> Andamento dell'altezza della nube tossica nello spazio nella vista laterale (riferite a 500 ppm) – caso reale e semplificato cartone (le curve sono sovrapposte).	50
<b>Figura 4.17.</b> Andamento della letalità nello spazio riferite al valore di LC50 (30 minuti) – caso reale e semplificato cartone (le curve sono sovrapposte).	51
<b>Figura 4.18a. e Figura 4.18b.</b> Andamento della temperatura nel tempo – caso semplificato e caso reale cartone.	53
<b>Figura 4.19a. e Figura 4.19b.</b> Andamento della portata massica della nube e della pirolisi sviluppata - caso semplificato e caso reale cartone.	54
<b>Figura 4.20a. e Figura 4.20b.</b> Andamento delle curve HRR - caso semplificato e caso reale cartone.	55

## 7. Tabelle

<b>Tabella 2.1.</b> Valori della velocità di combustione per unità di area e del calore di combustione effettivo (Quintiere, 1998).	11
<b>Tabella 2.2.</b> Correlazione tra livello di rischio e distanza di attenzione (DPCM 27 agosto 2021).	13
<b>Tabella 4.1.</b> Parametri di input della simulazione sul software CFAST – caso magazzino contenente pneumatici.	31
<b>Tabella 4.2.</b> Dati input e output Metodo ad Indici (DPCM 27/08/2021) - caso reale e caso semplificato magazzino contenente pneumatici	36
<b>Tabella 4.3.</b> Parametri di input della simulazione sul software CFAST – caso magazzino contenente materiali in PVC.	42
<b>Tabella 4.4.</b> Dati input e output Metodo ad Indici (DPCM 27/08/2021) - caso reale e caso semplificato magazzino contenente materiali in PVC.	47
<b>Tabella 4.5.</b> Parametri di input della simulazione sul software CFAST– caso magazzino contenente materiali in cartone.	52
<b>Tabella 4.6.</b> Dati input e output Metodo ad Indici (DPCM 27/08/2021) - caso reale e caso semplificato magazzino contenente materiali in cartone.	56

## 8. Equazioni

Equazione (2.1)	11
Equazione (2.2)	12
Equazione (2.3)	12
Equazione (2.4)	12
Equazione (2.5)	12
Equazione (2.6)	13

## 9. Bibliografia

- ARPA Piemonte, 2023. “Gestione delle emergenze ambientali (U.RP.T170)”. Rev. 4.
- Babrauskas, V. (2003) “Ignition Handbook”. Issaquah: Fire Science Publishers.
- Bertolini, L., & Gallo, M. (2020). “Analisi della dispersione atmosferica di inquinanti: Metodologie e applicazioni”. *Journal of Environmental Management*, 250, 109-120. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109120.
- Billmeyer, F. W. (1984). “Textbook of Polymer Science”. Wiley-Interscience.
- Cattani, G. (2024). “Inquinamento atmosferico”. UI, 314. <https://doi.org/10.62661/ui314-2024-176>.
- Certifico Srl (2021) “Potere calorifico materiali (Hi) [MJ/kg]”. URL: <https://www.certifico.com/id/14854> (accesso: 12/2024).
- Decreto Legislativo 3 agosto 2015, n. 105, “Attuazione della direttiva 2013/30/UE sulla sicurezza delle operazioni di esplorazione e produzione di idrocarburi”. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale*, n. 182, 7 agosto 2015.
- DNV (2025) “PHAST and PHAST LITE: Tutorial Manual”. URL: [www.dnvgl.com/software](http://www.dnvgl.com/software) (accesso: 12/2024).
- Drysdale, D. (2011) “An Introduction to Fire Dynamics”. 3rd edn. Chichester: Wiley.
- Gustin D., Colbassi M., Lepre E., Anastasio A., Contus D. e Pitacco D., (2017). “Chimica delle Macromolecole Introduzione ai polimeri Breve introduzione alla caratterizzazione, polimerizzazione e alle proprietà dei polimeri”. Moodle2 units. URL: [https://moodle2.units.it/pluginfile.php/112553/mod\\_resource/content/1/1%20relaz%20blended.pdf](https://moodle2.units.it/pluginfile.php/112553/mod_resource/content/1/1%20relaz%20blended.pdf) (accesso: 12/2024).
- Kwon, E. and Castaldi, M. (2009) “Fundamental understanding of the thermal degradation mechanisms of waste tires and their air pollutant generation in a N2 atmosphere”. *Environmental Science & Technology*, 43(21), pp. 8321-8327.
- Marino, F., et al. (2021). “Toxic Emissions from Fire of Recycled Materials: Implications for Public Health”. *Environmental Science & Technology*, 55(18), 1223-1234.
- NIST (2023) “CFAST: Consolidated Fire and Smoke Transport”. URL: <https://pages.nist.gov/cfast/manuals.html> (accesso: 12/2024).
- Presidente del Consiglio dei Ministri, (2021) Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 27 agosto 2021 “Approvazione delle linee guida per la predisposizione del piano di emergenza esterna e per la relativa informazione della popolazione per gli impianti di

stoccaggio e trattamento dei rifiuti”. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 204, 30 agosto 2021.

Presidente della Giunta Regionale, (2016) Legge 26 settembre 2016, n. 18 “Nuova disciplina dell’Agenzia regionale per la protezione ambientale del Piemonte (ARPA)”.

Presidente della Repubblica, (2018) Legge 1 dicembre 2018, n. 132 “Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 4 ottobre 2018, n. 113, recante disposizioni urgenti in materia di protezione internazionale e immigrazione, sicurezza pubblica, nonché misure per la funzionalità del Ministero dell'interno e l'organizzazione e il funzionamento dell'Agenzia nazionale per l'amministrazione e la destinazione dei beni sequestrati e confiscati alla criminalità organizzata. Delega al Governo in materia di riordino dei ruoli e delle carriere del personale delle Forze di polizia e delle Forze armate”. Art. 26 bis. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 281, 3 dicembre 2018.

Quintiere, James G. “Principles of fire behavior”. CRC Press, 1998.

Panagiotou, T. and Levendis, Y., (1994). “A study on the combustion characteristics of PVC, poly(styrene), poly(ethylene), and poly(propylene) particles under high heating rates”. *Combustion and Flame*, 99(1), pp.53-74. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)90082-5).

Puliga, F. (2022). “Studio della dispersione dei fumi tossici da incendi in impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti”. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Chimica, Politecnico di Torino.

Rossi, C. (2021). “Dalle evidenze della letteratura scientifica alla pratica d'uso quotidiana: la schiuma di poliuretano”. *Chirurgia*, 34(4). <https://doi.org/10.23736/s0394-9508.21.05330-4>.

Singh, A., Scott, N.A., Stone, E.A., et al. (2015) “Uncontrolled combustion of shredded tires in a landfill – Part 2: Population exposure, public health response, and an air quality index for urban fires”, *Atmospheric Environment*, 115, pp. 365-374.

Yang, S., Wu, W., Jiao, Y., Fan, H., & Cai, Z. (2016). “Polietilenglicole–silsesquiossano oligomero poliedrico come nuovo plastificante e stabilizzatore termico per nanocompositi di polivinilcloruro”. *Polymer International*, 65(10), 1172-1178. <https://doi.org/10.1002/pi.5166>.

## 10. Ringraziamenti

Desidero esprimere il mio più sentito ringraziamento al mio Relatore, Professor Luca Marmo, per la sua disponibilità, per i preziosi suggerimenti pratici e per l'approccio sempre costruttivo che ha caratterizzato la sua guida durante tutto il percorso. Un sincero grazie va anche al mio Correlatore, Professor Andrea Carpignano, il cui supporto e i cui consigli sono stati fondamentali per lo sviluppo di questo lavoro, e che mi ha fornito indicazioni essenziali per affrontare al meglio ogni fase del progetto.

Desidero esprimere un particolare ringraziamento a tutta la struttura "Impianti industriali e energia" di Arpa Piemonte per avermi offerto l'opportunità di sviluppare questo progetto, un'esperienza che si è rivelata altamente formativa e stimolante, permettendomi di accrescere le mie competenze professionali e di arricchire significativamente il mio percorso accademico. In particolare, desidero ringraziare Barbara, la mia instancabile tutor e collega, per la sua pazienza, disponibilità e per il supporto con cui mi ha seguita passo dopo passo nella stesura dell'elaborato, sempre con grande dedizione. Un ringraziamento speciale va anche a Chiara, collega e amica, che mi ha sostenuta durante tutto il percorso di stesura, con cui ho condiviso non solo i momenti di stress, ma anche quelli di soddisfazione. Un sincero grazie va inoltre al mio responsabile Fabio, il cui incoraggiamento nel proseguire l'argomento del presente lavoro di tesi è stato determinante, così come i suoi consigli utilissimi che mi hanno guidato nei momenti più difficili. Inoltre, desidero ringraziare di cuore Morena, amica e in parte collega, che mi è stata accanto durante le mille sfaccettature di questo progetto, sempre pronta a supportarmi in ogni fase.

Infine, con un affetto e un amore che vanno oltre le parole e che a volte non riesco a esprimere come vorrei, desidero ringraziare con tutto il cuore la mia famiglia allargata, composta da mamma, papà, Stefy, Chicco, familiari, parenti e amici, che mi ha accompagnata con amore e pazienza in ogni momento di questo percorso e non solo, supportandomi, incoraggiandomi, gioendo e piangendo insieme a me. Grazie di cuore, siete il mio tutto.