



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELLA SICUREZZA CIVILE E INDUSTRIALE

Tesi di Laurea Magistrale
INCENDI IN STOCCAGGI DI RIFIUTI
MODELLAZIONE QUANTITATIVA DI SCENARI DI
INCENDIO CON CODICE DI CALCOLO FDS

Relatore: Prof. GIUSEPPE MASCHIO

Correlatore: Ing. PAOLO MOCELLIN

Laureanda: MARTA CALDONAZZO

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

Riassunto

Nel presente elaborato sono stati presi in considerazione i fenomeni di incendio in siti di deposito e stoccaggio. Sulla base di accurati approfondimenti, sono stati selezionati quattro tipi di materiale plastico perché ritenuti rappresentativi delle comuni frazioni merceologiche tipicamente presenti presso siti di deposito. Con ognuna di queste matrici, sono state condotte delle simulazioni di incendio servendosi di FDS (Fire Dynamics Simulator). Si sono presi in considerazione svariati scenari di incendio, considerando la variabilità delle condizioni atmosferiche. Con i risultati ottenuti sono state condotte delle elaborazioni per indagare caratteristiche e comportamento dei fumi di combustione e dell'azione termica generata dall'incendio.

Indice

Riassunto	1
Introduzione	6
La problematica degli incendi di rifiuti.....	8
1.1 Evoluzione storica e normativa	9
1.2 Alcuni dati	14
1.3 Materiali e composti tipici degli stabilimenti di rifiuti.....	16
1.4 Prodotti di combustione [3][4][5].....	24
1.4.1 Diossine e furani.....	25
1.4.2 Policlorobifenili (PCB).....	26
1.4.3 Idrocarburi policiclici aromatici (IPA).....	26
1.4.5 Altri prodotti ed effetti sulla salute.....	26
1.5 Aspetti ambientali e sanitari. Impatti su ecosistema e uomo.....	30
1.6 L'approccio al lavoro	31
Il ciclo dei rifiuti, matrici plastiche e combustibili.....	32
2.1 Il ciclo dei rifiuti.....	32
2.2 Le matrici selezionate.....	33
2.3 Recupero e riciclaggio dei rifiuti plastici	34
2.3.1 Le operazioni di selezione	36
2.3.2 Fasi di recupero a seconda del materiale.....	42
2.6 Stabilimenti di rifiuti: matrici combustibili tipiche	44
2.7 Le criticità nel riciclo della plastica.....	47
La fluidodinamica degli incendi e FDS.....	50
3.1 Dinamica dell'incendio: modalità di innesco e propagazione degli incendi nei depositi di rifiuti misti.....	50
3.1.1 Innesco.....	50
3.1.2 Propagazione	53
3.1.3 Evoluzione e velocità di crescita: confronto tra incendio di compartimento e incendio all'aperto	55
3.2 I software di fluidodinamica computazionale. L'utilizzo di FDS e SMOKEVIEW	64
3.2.1 – Ragioni di utilizzo dei software CFD.....	64
3.2.2 Caratteristiche principali di FDS: potenzialità e limiti	65
Simulazioni di incendi di rifiuti.....	70
4.1 Scelta dei dati di input e dei parametri della simulazione	70
4.1.1 Le matrici sorgente.....	70
4.1.2 Definizione del dominio.....	71

4.1.3 Rappresentazione del termine sorgente incendio	73
4.1.4 Condizioni ambientali al contorno	75
4.1.5 Modellazione della reazione di combustione	79
4.1.6 Esecuzione della simulazione e tempo di calcolo	84
4.2 Selezione degli output da analizzare	84
Analisi dei risultati e discussione	91
5.1 Le simulazioni: tipologia, modalità e parametri usati	91
5.2 Prove eseguite con polietilene	93
5.2.1 Analisi qualitativa dell'evoluzione del pennacchio dei fumi	93
5.2.2 Analisi dei prodotti di combustione	95
5.2.3 Analisi termica	100
5.3 Prove eseguite con polipropilene.....	106
5.3.1 Analisi qualitativa dell'evoluzione del pennacchio dei fumi	106
5.3.2 Analisi dei prodotti di combustione	107
5.3.3 Analisi termica	115
5.4 Prove eseguite con polistirene	119
5.4.1 Analisi qualitativa dell'evoluzione del pennacchio dei fumi	119
5.4.3 Analisi termica	130
5.5 Prove eseguite con polivinilcloruro.....	135
5.5.1 Analisi qualitativa dell'evoluzione del pennacchio dei fumi	135
5.5.2 Analisi dei prodotti di combustione	136
5.5.3 Analisi termica	138
5.6 Analisi comparativa dei risultati.....	140
Conclusioni.....	145
Riferimenti bibliografici	147

Introduzione

La presente tesi ha come oggetto di studio i depositi di rifiuti all'aperto e nello specifico si occupa di approfondire le dinamiche di incendio che sempre più spesso li colpiscono. Gli incendi in siti di stoccaggio all'aperto sono un fenomeno che si è verificato in Italia con una frequenza non trascurabile negli ultimi anni e con una dispersione generalizzata su tutto il nostro territorio nazionale. Le cause, su cui anche nella presente trattazione si farà una breve disamina, sono svariate e di diversa natura, talvolta accidentale, talvolta di origine dolosa o colposa.

Il corpo legislativo prevede molteplici disposizioni in termini di gestione e operatività, modalità di stoccaggio e deposito con lo scopo di attuare un'adeguata prevenzione. Le fonti sono molte e comprendono linee guida, direttive europee, leggi nazionali, circolari ministeriali e pratiche interne ad una determinata attività.

Ad oggi gran parte della responsabilità è scaricata sul gestore del deposito, che deve fare un'adeguata analisi del rischio al fine di individuare quali siano i potenziali pericoli presenti e poi valutare quali scenari di rischio si possano configurare. Il mantenimento delle migliori condizioni stabilite è responsabilità di tutti gli operatori coinvolti.

L'analisi del rischio è una preziosa e insostituibile fase che permette di agire lavorando non solo sulla prevenzione ma che vi affianca un'accurata fase di studio delle possibili conseguenze. Una volta individuato un rischio, per fare prevenzione si cerca di ridurre al minimo la probabilità che questo si manifesti, espletando delle conseguenze. Si parla di riduzione e non di eliminazione del rischio con precisa cognizione di causa. L'unica strada percorribile per arrivare ad affermare che il rischio non esiste è eliminare il pericolo, il quale essendo spesso una caratteristica intrinseca al sistema di lavoro, non è rimuovibile. Occorre quindi accettare realisticamente che il rischio non sia mai pari zero. Ciò impone di assumere che l'evento indesiderato accada, per studiarne i possibili impatti in relazione alla dinamica di sviluppo dell'incidente e le possibili conseguenze. Questo è un punto cruciale perché permette di ottimizzare e predisporre azioni di mitigazione ad hoc per il contenimento dei possibili danni.

L'assetto normativo oggi giorno fornisce indicazioni e accorgimenti per evitare l'insorgenza di incendi nei depositi di rifiuti anche se, come si vedrà più avanti, nel campo della normativa antincendio non esiste ancora una trattazione specifica per gli incendi in depositi di rifiuti all'aperto.

Gli studi e le sperimentazioni su ciò che accade durante e dopo l'incendio sono ancora oggetto di dibattito e di ricerca, perciò ad oggi si lavora prevalentemente sulla prevenzione.

Si ritiene molto importante conoscere quali siano le dinamiche dell'incendio, quale sia l'evolversi del fenomeno e quali fattori possano favorire o limitarne lo sviluppo. Nella presente

trattazione sono state condotte varie simulazioni mediante codice di calcolo su eventi di combustione. Parte dell'attenzione è stata volta allo studio e all'analisi della matrice aria, cercando di indagare quali sostanze vengano emesse durante la combustione e, fissando dei parametri di monitoraggio, studiarne l'andamento.

Lo studio dei fenomeni di combustione in campo aperto fornisce dei risultati di duplice interesse: gli impatti derivanti da un incendio possono avere ripercussioni sia sull'aspetto ambientale che sanitario. Uomo e ambiente sono due obiettivi sensibili, cardine e fondamento nonché destinatari delle conquiste nel campo della Scienza e dell'Ingegneria della Sicurezza.

Capitolo 1

La problematica degli incendi di rifiuti

Il presente elaborato ha come oggetto di studio il fenomeno degli incendi di rifiuti in depositi all'aperto. L'esigenza di approcciare questo argomento è molto attuale ma deriva da una problematica che ha messo le prime radici molti anni fa. I primi episodi significativi di roghi all'aperto si sono verificati nella regione Campania, principalmente nella zona che si estende tra le province di Napoli e Caserta, ad oggi nota come la 'Terra dei Fuochi'. Non si pensi tuttavia che questo sia un fenomeno circoscritto perché, al contrario, rappresenta oramai uno scempio ambientale che interessa il nostro territorio nazionale in tutta la sua estensione.

Le motivazioni che portano al verificarsi di questi fenomeni sono svariate. Molto spesso si ricorre alla pratica incendiaria per far sparire i rifiuti derivanti da attività illecite, frutto di organizzazioni clandestine o del lavoro nero. Si tratta di veri e propri rifiuti industriali che non possono essere smaltiti secondo i canali convenzionali perché illegali. Più recentemente i problemi sembrano derivare da una incapacità di gestire i rifiuti, dovuta a carenze degli impianti o a lacune nella filiera di gestione dei rifiuti stessi. Entrambe queste due ragioni presentano probabilmente un fondamento comune ed è il seguente: fino a non molto tempo fa era prassi comune spedire in Cina molti dei rifiuti prodotti all'interno del proprio Stato. Le regioni cinesi importavano rifiuti di varie tipologie derivanti da tutto il mondo in quantità significative (si parla di più della metà della produzione globale annua). Quando nel 2018 in Cina è entrato in vigore il blocco delle importazioni, molti Stati si sono trovati a dover gestire enormi quantità di rifiuti in impianti con capacità di smaltimento non sufficiente. Inoltre, alcuni dei rifiuti che venivano inviati all'estero e che oggi vanno gestiti all'interno del proprio territorio nazionale, presentano delle caratteristiche di incompatibilità rispetto agli standard previsti per il riciclaggio o il conferimento lasciando di fatto al gestore del deposito l'onere (gestionale, ma anche economico) dello smaltimento. Si ritiene superfluo specificare che quest'ultimo aspetto non è una giustificazione all'adozione di comportamenti illeciti ma sicuramente un valido movente, nonché una profonda vulnerabilità della gestione virtuosa del ciclo dei rifiuti, che non può essere ignorata.

Sicuramente non tutti gli incendi che si verificano in depositi all'aperto sono di origine dolosa ma possono essere imputati ad una malagestione degli spazi e dei luoghi di lavoro. Ciò anche in ragione del fatto che per molti anni non è stato possibile affidarsi o fare appello ad un riferimento normativo che congiungesse la prevenzione incendi alla gestione dei depositi.

Vediamo di seguito quale sia stata l'evoluzione nel corso di questi ultimi due decenni.

1.1 Evoluzione storica e normativa

1.1.1 Il fenomeno della terra dei fuochi

Nei primi anni 2000 in molti comuni della Campania si sono verificano ripetuti incendi che hanno interessato cumuli di rifiuti abbandonati all'aperto o interrati abusivamente (le cosiddette 'fumarole'). Data la costante ripetitività della cosa, è stato ipotizzato quasi da subito che i roghi non siano eventi casuali ma l'opera precisa di un'organizzazione strutturata. Il racket dei rifiuti si è consolidato velocemente dal momento che ha una resa economica molto favorevole, senza particolari efficaci ostacoli di tipo legislativo. Di fronte all'evidente vuoto normativo lo Stato ha reagito introducendo per la prima volta nel 2013 il reato di combustione di rifiuti. (D.L. 10 dicembre 2013 n. 136, coordinato con la legge di conversione L. 6/2014). Pur avendo applicazione specifica al caso della regione Campania, il D.L. ha riservato un articolo di carattere generale – nella fattispecie l'art 3 'Combustione illecita di rifiuti' - che con il comma 1 è andato a modificare il preesistente D. Lgs.152/2006 (Testo Unico, Norme in materia ambientale) con l'inserimento dell'art 256-bis. Quest'ultimo reca le disposizioni in merito alle sanzioni in cui incorrono coloro che siano coinvolti in un incendio di rifiuti, stabilendo pene commisurate alla gravità del fatto e al tipo di responsabilità ricoperta nel contesto.

1.1.2 L'intervento della Commissione parlamentare d'inchiesta

A fronte del continuo ripetersi di episodi di incendio che hanno colpito molti depositi di rifiuti in svariate regioni d'Italia, la *Commissione parlamentare di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti* intraprende uno studio di approfondimento sulla questione concludendo che:

l'elevato impegno di risorse richiesto da un incendio presso impianti di gestione e trattamento di rifiuti, in termini di operazioni di spegnimento da parte dei vigili del fuoco, di interventi di tutela della popolazione, di monitoraggi ambientali e di investigazioni, "è tale da suggerire o imporre un investimento adeguato nella prevenzione che sicuramente corrisponde a un interesse non solo di tutela ambientale ma anche di migliore gestione delle risorse pubbliche" ¹

aprendo così di fatto la strada alla gestione del fenomeno degli incendi di rifiuti.

1.1.3 Circolare ministeriale n. 1121 (MATTM) "Linee guida per la gestione operativa degli stoccaggi negli impianti di gestione dei rifiuti e la prevenzione dei rischi"

Proprio in risposta a questa sollecitazione, in data 15 marzo 2018 la Direzione generale per i rifiuti e l'inquinamento del Ministero dell'Ambiente della Tutela del Territorio e del Mare, in collaborazione con il Dipartimento dei Vigili del Fuoco, le agenzie ambientali, le autorità

¹ Commissione Parlamentare d'inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti 'Relazione sul fenomeno degli incendi negli impianti di trattamento e smaltimento di rifiuti', pag. 96.

competenti e le amministrazioni regionali, ha emesso una circolare recante “Linee guida per la gestione operativa degli stoccaggi negli impianti di gestione dei rifiuti e per la prevenzione dei rischi”, modificata poi con circolare ministeriale protocollata in data 21 gennaio 2019.

La circolare ha lo scopo di indicare una serie di accorgimenti e di criteri operativi utili per promuovere una gestione degli stoccaggi sicura ed efficiente, con particolare riferimento alla problematica degli incendi.

Nel documento vengono fornite delle ‘Prescrizioni generali da richiamare negli atti autorizzativi’, contenenti disposizioni in merito all’ubicazione dell’impianto e requisiti tecnici di natura generale od organizzativa che devono essere obbligatoriamente applicati da chi gestisce rifiuti; prescrive inoltre dotazioni minime ai fini della sicurezza di cui questi impianti e depositi devono essere equipaggiati. La parte inerente alle modalità di gestione riporta ovviamente un paragrafo apposito sulla corretta gestione delle emergenze. Richiede inoltre di eseguire una continua attività di controllo, per agire sulle fonti di innesco ed eventualmente identificare l’incendio nelle prime fasi di combustione. Ognuno di questi aspetti cerca di agire in riferimento al rischio incendio sulla prevenzione e/o a protezione dei siti.

Nella circolare si sottolinea più volte il fatto che l’entità del rischio dipende dalla tipologia di rifiuto stoccato, dalle attività che si svolgono presso l’impianto e le eventuali interazioni o modificazioni che i rifiuti possono subire durante il deposito. Per questo si insiste molto sul cercare di adottare buone pratiche di gestione all’interno del sito, rispettando le capacità massime di stoccaggio (per mantenere contenuta la quantità di carico incendio), differenziare i rifiuti e le aree di deposito, cercando di suddividerli il più possibile in categorie omogenee. Formazione e informazione del personale a tutti i livelli sono una pratica imprescindibile e indipendente dal livello di rischio stimato.

Ad oggi costituisce il riferimento normativo più specifico in materia di incendi di rifiuti in depositi di stoccaggio.

1.1.4 Il “Decreto Sicurezza”, D.L. 113/2018 Art. 26-bis

Sempre nel 2018, all’atto di conversione del D.L. 113/2018 – il cosiddetto “Decreto Sicurezza” - con L. 132/2018, sono state apportate delle modifiche tra cui l’aggiunta dell’art 26-bis che richiede la predisposizione di un piano di emergenza interno ed esterno (quest’ultimo da attuarsi nel caso di incidente rilevante) per gli impianti di stoccaggio e lavorazione dei rifiuti sia di nuova realizzazione che per quelli esistenti. Le finalità sono elencate di seguito:

- mitigare i danni, minimizzando le conseguenze del verificarsi di un incidente. L’attenzione è posta sia sulla salvaguardia della vita umana che sulla protezione dell’ambiente. Si suggerisce esplicitamente di trovare soluzioni per controllare e circoscrivere gli incidenti e istituire un

sistema di informazione per lavoratori, cittadini, servizi di emergenza e autorità competenti per il rapido intervento.

- organizzare misure di intervento da attuare nel caso di incidenti rilevanti e le successive operazioni di ripristino e disinquinamento ambientale. Il piano deve essere periodicamente revisionato e costantemente aggiornato.

Per quanto concerne il piano di emergenza esterno, i gestori degli impianti hanno l'obbligo di trasmettere al Prefetto competente tutte le informazioni utili per l'elaborazione; a seguire, il Prefetto (in collaborazione con le Regioni e con gli Enti locali interessati) predispose il piano di emergenza esterna all'impianto e ne coordina l'attuazione.

Questa legge non dà riferimenti specifici alla tipologia di evento che si possa verificare ma il caso di incendio rientra a pieno titolo sotto la generale definizione di 'incidente' o, in presenza di determinate condizioni, di 'incidente rilevante'.

1.1.5 Regione del Veneto, Regolamento regionale

Nella regione del Veneto è attualmente in vigore la Legge regionale del 21 gennaio 2000, n. 3 (BUR n. 8/2000) che con le successive modifiche ed integrazioni, regola la gestione dei rifiuti in materia ambientale, definendo le competenze di Province e Comuni.

L'art 21 in merito a "Requisiti tecnici e ubicazione degli impianti" riporta quanto segue:

1- Nella progettazione, realizzazione ed esercizio degli impianti di recupero e di smaltimento dei rifiuti devono essere utilizzati i migliori ritrovati della tecnica idonei al conseguimento degli obiettivi della massima tutela della salute degli abitanti e di progressiva riduzione dell'impatto ambientale derivante dai rifiuti.

Affida cioè al progettista e al gestore dell'impianto l'onere di minimizzare gli impatti ambientali derivanti dai rifiuti, sia in condizioni di normale esercizio che in condizione di emergenza quale potrebbe verificarsi in caso di incendio. In supporto a ciò la Giunta regionale delibera e mantiene aggiornate delle direttive. La Legge ammette l'individuazione di soluzioni che siano anche economicamente praticabili.

Inoltre, l'art 22 concernente la "Presentazione del progetto degli impianti e relativi elaborati tecnici" stabilisce che dalla data di promulgazione della legge, per gli impianti di nuova realizzazione di recupero o smaltimento dei rifiuti (anche pericolosi) debba essere presentata, oltre alla documentazione tecnica prevista, anche il progetto definitivo dell'impianto. Per quest'ultimo, il comma 2 dello stesso articolo stabilisce requisiti minimi, tra cui si riporta che il progetto definitivo deve prevedere:

'un piano di sicurezza che disponga le procedure da adottarsi in caso di incidente grave che si estenda al perimetro esterno dello stabilimento. Tale piano deve essere

accessibile agli interessati e verificabile da parte delle Autorità comunali e di quelle che esercitano la vigilanza'

A seguito dell'emanazione dell'art 26-bis della L. 132/2018, il Direttore di Area Tutela e Sviluppo del Territorio Regione Veneto ha ribadito, con nota circolare, come il piano di sicurezza per gli impianti di nuova costruzione fosse già richiesto dalla Legge Regionale in questione e possa quindi soddisfare anche le prescrizioni del suddetto articolo 26-bis.

1.1.6 L'iniziativa "pilota" di monitoraggio speciale della Regione Veneto

In Veneto è stato istituito un ufficio per il monitoraggio degli impianti che effettuano attività di stoccaggio, trattamento, recupero e smaltimento dei rifiuti, al fine di estendere i controlli previsti dal DPR 151/2011 anche ad attività non ricomprese nel relativo allegato I ma eventualmente iscritte all'Albo Nazionale dei Gestori Ambientali. L'iniziativa resta unica nel panorama nazionale, non trovando - almeno per ora - progetti analoghi nelle altre Regioni.

1.1.7 D. Lgs. 81/2008, Testo Unico sulla Salute e la Sicurezza sul Lavoro

A onor del vero, c'è da ricordare che il D. Lgs. 81/2008, che disciplina in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro, impone al datore di lavoro di condurre e redigere una valutazione dei rischi correlati all'attività. Tra i vari aspetti che deve considerare non può mancare un'accurata valutazione del rischio incendio. Quindi, essendo i depositi di rifiuti dei "luoghi di lavoro" a tutti gli effetti, ne deriva che il gestore del sito è tenuto già dal 2008 a fare una valutazione del rischio incendio a prescindere da qualsiasi altra normativa specifica.

1.1.8 Normativa antincendio nel contesto della gestione dei rifiuti, Regola Tecnica di prevenzione incendi (in approvazione)

Spostandoci nel campo di applicazione della normativa antincendio non troviamo ancora una materia che tratti specificatamente incendi di depositi di rifiuti. C'è da considerare tuttavia che nel DPR 151/2011, che nel suo allegato I stila una serie di attività soggette al controllo di prevenzione incendi dei Vigili del Fuoco, troviamo delle voci dedicate a depositi di natura varia. Si riporta un elenco con relative descrizioni di seguito:

Attività 34: depositi di carta, cartoni e prodotti cartotecnici, archivi di materiale cartaceo, biblioteche, depositi per la cernita della carta usata, di stracci di cascami e di fibre tessili per l'industria della carta, con quantitativi in massa superiori a 5000 kg.

Attività 36: depositi di legnami da costruzione e da lavorazione di legna da ardere, di paglia, di fieno, di canne, di fascine, di carbone vegetale e minerale, di carbonella, di sughero e di altri prodotti affini con quantitativi in massa superiori a 50000 kg con esclusione dei depositi all'aperto con distanze di sicurezza esterne superiori a 100 m.

Attività 43: stabilimenti ed impianti per la produzione, lavorazione e rigenerazione della gomma e/o laboratori di vulcanizzazione di oggetti di gomma, con quantitativi in massa superiori a 5.000 kg; depositi di prodotti della gomma, pneumatici e simili con quantitativi in massa superiori a 10000 kg

Attività 44: stabilimenti, impianti, depositi ove si producono, lavorano e/o detengono materie plastiche, con quantitativi in massa superiori a 5000 kg.

Attività 47: stabilimenti ed impianti per la fabbricazione di cavi e conduttori elettrici isolati, con quantitativi in lavorazione e/o in deposito superiori a 10000 kg. Depositi e/o rivendite di cavi elettrici isolati con quantitativi superiori a 10000 kg

Attività 55: Attività di demolizioni di veicoli e simili con relativi depositi, di superficie superiore a 3000 m².

Attività 70: Locali adibiti a depositi di superficie lorda superiore a 1000 m² con quantitativi di merci e materiali combustibili superiori complessivamente a 5000 kg.

Le attività dell'allegato I sono suddivise in tre categorie (A, B, C) a seconda delle caratteristiche di pericolosità, e quindi di rischio, a cui consegue un'adeguata disciplina amministrativa e un diverso livello di controllo.

Per gli impianti di deposito ricadenti in categoria B e C è richiesta la presentazione della documentazione conforme, comprendente relazioni, elaborati grafici e planimetrie, necessarie alla valutazione dei progetti. Inoltre, il gestore dell'impianto è tenuto a presentare la SCIA segnalando così l'inizio dell'attività ai Vigili del Fuoco che eseguiranno controlli a campione per le attività ricadenti in categoria A e B, o controlli con sopralluogo certo per le attività in categoria C.

Nel 2018, con decreto del Capo del Corpo n. 127 del 19 novembre 2018, si è provveduto alla formazione di un gruppo di lavoro che comprenda esperti del Corpo dei VVF ma anche due funzionari del MATTM affinché tali figure possano collaborare nella creazione di una regola tecnica di prevenzione incendi per i depositi di stoccaggio di rifiuti. Il focus principale è sempre su prevenzione e protezione degli incendi, che devono essere predisposte tenendo conto della tipologia e delle caratteristiche del deposito, così come della natura dei rifiuti ivi stoccati. La regola tecnica è ancora in fase di elaborazione e sarà applicabile a depositi di stoccaggio come definito dal D. lgs. n. 205/2010 anche se non rientranti tra le attività classificate all'allegato I del DPR 151/2011.

1.1.9 La linea guida finlandese

In realtà un primo testo che cercava di mettere ordine sul tema del rischio incendio nei depositi di rifiuti circolava già a livello europeo dal 2014 e consiste in una Linea Guida redatta dalla CFPA-E. La CFPA-E (Confederazione di Associazioni di Prevenzione Incendi in Europa) raggruppa associazioni che si sono rese disponibili a collaborare per creare linee guida adottabili nei vari paesi europei. La finalità è quella di elaborare un fronte comune di interpretazioni e indicazioni operative in materia di prevenzione incendi, fornendo modelli e soluzioni esemplificative accettabili. Oltre a cercare di rendere omogeneo l'approccio alla prevenzione, lo scopo principale è quello di supportare e incentivare le nazioni nell'attività di prevenzione.

La LINEA GUIDA numero 32:2014 F ⁽²⁾ contiene requisiti di prevenzione incendi e le relative misure da prendere in esame per impianti di trattamento e/o riciclo dei rifiuti, dove si presuppone l'esistenza di immagazzinamento di rifiuti, nonché stoccaggio di masse combustibili in frazioni omogenee o miste. Parte della trattazione è dedicata specificatamente a depositi all'aperto.

Di fatto non ha mai avuto valore cogente ma poteva essere utilizzato come valido riferimento per chi, trovandosi a capo della gestione di un deposito di rifiuti, avesse voluto operare in condizioni virtuose.

1.2 Alcuni dati

Nonostante negli ultimi due decenni ci sia stato un lavoro intenso per porre dei limiti normativi e incanalare con buone pratiche la gestione dei depositi di rifiuti, il numero degli incendi di rifiuti di natura accidentale o dolosa ha continuato inesorabilmente a salire.

Relativamente al periodo 1° gennaio 2017 - 31 dicembre 2017, si sono verificati 1182 incendi in depositi di rifiuti, facendo registrare una variazione percentuale del numero di interventi in aumento del 71.4% rispetto alla media 2015-2016 [1]. Più in generale l'8.2% degli incendi totali avvenuti nello stesso periodo in tutta la Nazione ha interessato i rifiuti, per un totale di 26.580 eventi accidentali [1].

² Le proposte contenute nella Linea Guida in questione sono state prodotte da *VdS Schadenverhütung* (grande istituto europeo per la protezione aziendale che offre servizi anche nel campo dell'antincendio) e l'autore è Hardy Rusch (Germania). La stessa Linea Guida è stata compilata dalla Commissione Guidelines e adottata da tutte le associazioni di prevenzione incendi della Confederazione di Associazioni di prevenzione incendi in Europa.

Nelle figure seguenti, Figura 1.1 e Figura 1.2³, si riporta in veste grafica quanto appena detto, corredando le informazioni con una panoramica generale sui luoghi e le sostanze di principale interesse, per favorirne una migliore contestualizzazione.



Figura 1. Errore. Per applicare 0 al testo da visualizzare in questo punto, utilizzare la scheda Home..1: Variazione (percentuale) riscontrata nel 2017 rispetto alla media del biennio 2015-2016 riguardo il numero di interventi dei VVF per "incendi ed esplosioni". Fonte: annuario dei Vigili del Fuoco, periodo di riferimento 01/01/2017 -31/12/2017, dati aggiornati al 13/03/2018.

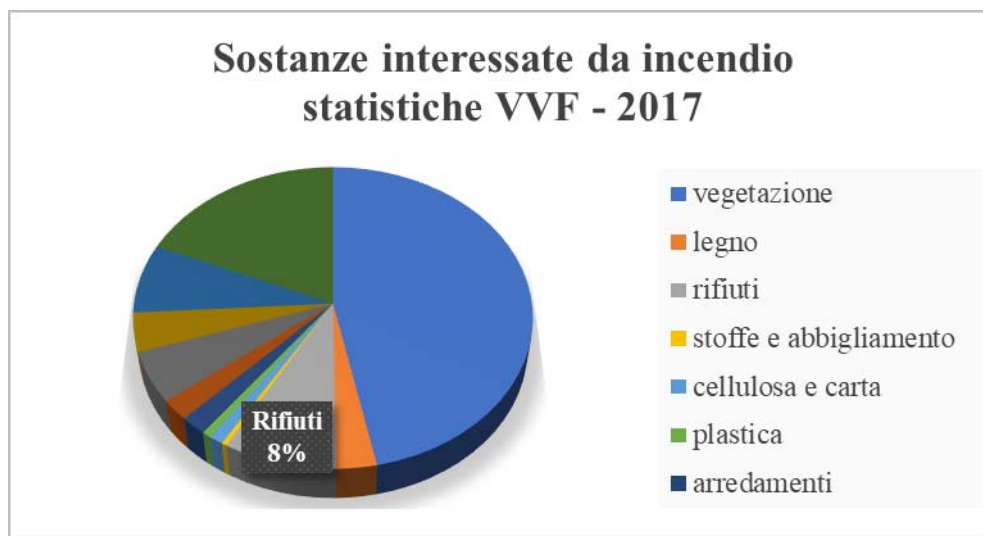


Figura 1.2: Tipologie di sostanze maggiormente interessate da incendio (2017). Statistiche annuario dei Vigili del Fuoco, periodo di riferimento 01/01/2017 -31/12/2017, dati aggiornati al 13/03/2018. Il grafico illustra quale sia la percentuale degli interventi necessaria per lo spegnimento di incendi che interessano una specifica tipologia di materiale. Nonostante sia stato applicato un filtro che ha ristretto il numero delle sostanze da 127 a 31, sono rappresentati nel grafico il 97.2% degli interventi.

³ Nel grafico in Fig. 1.2, alla voce 'vegetazione' si annoverano gli incendi che hanno interessato sterpaglie, arbusti e macchia mediterranea, alberi, fieno, paglia e simili, piantagioni in genere. Sotto la voce 'legno' sono ricompresi gli incendi che hanno coinvolto materiali come legno, sughero, strutture portanti in legno, polveri e trucioli in legno. Nell'annuario non è meglio specificato cosa rientri sotto la categoria 'altri combustibili solidi'. La categoria 'elementi da costruzione' raggruppa gli incendi avvenuti su tetti, camini, canne fumarie e comignoli, più 'altri' non meglio specificati. Nel gruppo 'mezzi di trasporto' sono compresi autovetture, autocarri, motoveicoli, macchine operatrici e 'altri' non meglio specificati. Sotto la generale categoria 'altri' si annoverano bidoni ecologici, quadri elettrici e impianti elettrici, apparecchi elettrici utilizzatori, macchinari in genere e incendi per i quali la scheda di intervento sia risultata ancora 'aperta' al momento dell'elaborazione della statistica e i cui dati siano stati solo parzialmente inseriti.

Il dirigente dell'ufficio del Capo del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, Francesco Notaro, nell'articolo 'Il pericolo incendi negli stoccaggi di rifiuti' pubblicato sulla rivista ufficiale n° 18 dei VF riporta i dati relativi ai primi sei mesi del 2019, affermando che gli incendi verificatisi nelle discariche sono stati 318, in netta superiorità rispetto ai 210 del primo semestre del 2018.

Pertanto, risulta evidente che il fenomeno è ancora di forte attualità, che il lavoro da svolgere è tuttora molto e che risulta necessario studiare quali siano gli impatti possibili sulla società.

Gli aspetti sono molteplici e ognuno nel proprio settore deve fare la piccola parte che gli spetta. Procedendo con la presente trattazione, come già anticipato, si andranno a riproporre delle modellizzazioni di eventi di incendio. Tuttavia, prima di inoltrarsi nel cuore del lavoro, occorre fare un'accurata disamina sulla matrice interessata da combustione e presa in esame ai fini del presente studio: i rifiuti. Affrontare questo aspetto non è semplice data la vastità dei differenti elementi che è necessario esaminare. Per questo motivo si è ritenuto necessario dedicare interamente il seguente paragrafo per chiarire cosa si intenda per rifiuto e quali siano i ritmi di produzione, per arrivare poi a esplorare il mondo della gestione dei rifiuti e le categorie principali di materiali post-consumo conferiti presso gli stabilimenti di deposito e stoccaggio.

1.3 Materiali e composti tipici degli stabilimenti di rifiuti

1.3.1 Tipologie generali di rifiuti

Secondo quanto riportato dal D. Lgs. 152/2006, recante le norme in materia ambientale, per rifiuto si intende *'qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi'*. I rifiuti vengono classificati in relazione a origine e caratteristiche di pericolosità.

In base all'origine si distinguono in 'rifiuti urbani' e 'rifiuti speciali'.

Tra i rifiuti urbani si annoverano i rifiuti prodotti in ambito domestico e sono compresi anche gli ingombranti. In questa categoria ricadono sia i rifiuti prodotti in locali adibiti ad uso civile che quelli assimilabili a questi ultimi per qualità e quantità, ma derivanti da attività diverse. Si aggiungono anche i rifiuti provenienti dallo spazzamento e la raccolta nelle strade, in aree pubbliche e naturalistiche (spiagge, laghi, aree verdi e giardini) e dalle aree cimiteriali.

Nel 2018 in Italia sono stati prodotti quasi 30.2 milioni di tonnellate di rifiuti urbani, registrando un leggero rialzo rispetto al precedente anno, ma confermando il netto ribasso rispetto al quinquennio 2005-2010 [9]. In Fig.1.3 è possibile vedere l'andamento della produzione di rifiuti urbani relativamente al periodo 2005-2018.

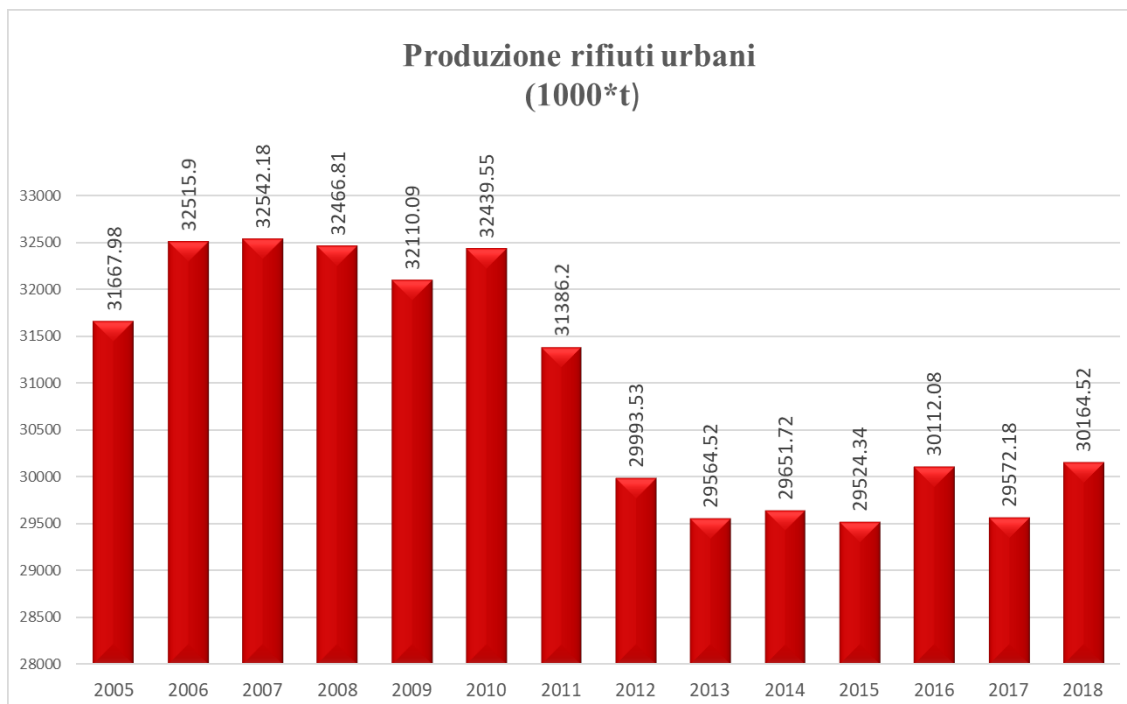


Figura 1.3: Produzione nazionale rifiuti urbani, periodo di riferimento 2005-2018 ⁽⁹⁾.

Nel 2017, in Veneto sono state prodotte circa 2 milioni di tonnellate di rifiuti urbani, di cui più di un milione e mezzo sono state avviate a recupero, 296 mila tonnellate sono state avviate a trattamento e 95 mila in discarica. [10]

Gli indici di produzione pro capite di rifiuti urbani elaborati da ISPRA riportano una produzione di RU pari a 497 kg/(ab-anno) nel 2016 con riferimento all'intero territorio nazionale e pari a 452 kg/(ab-anno) nel 2017 con riferimento solo alla regione Veneto. [11]

Con l'appellativo di rifiuti speciali si fa invece riferimento ai materiali di scarto derivanti da attività agricole e agro-industriali o da attività di demolizione, costruzione e scavo. Nello stesso gruppo rientrano anche i rifiuti prodotti da attività industriali, artigianali, commerciali, sanitarie e di servizio. Sono rifiuti speciali anche i materiali derivanti da attività di recupero e smaltimento dei rifiuti, i fanghi prodotti nella depurazione di acque reflue e più in generale tutti i materiali di risulta derivanti da processi di inquinamento.

Nel 2017, in Italia sono stati prodotti 138.9 milioni di tonnellate di rifiuti speciali [12], di cui 14 milioni solo in Veneto [13]. Il dato nazionale ha riportato un incremento pari circa al 2.9% rispetto al precedente dato del 2016.

Si riporta di seguito la ripartizione percentuale della produzione totale di rifiuti speciali, per attività economica, relativamente ai dati ISPRA del 2017.

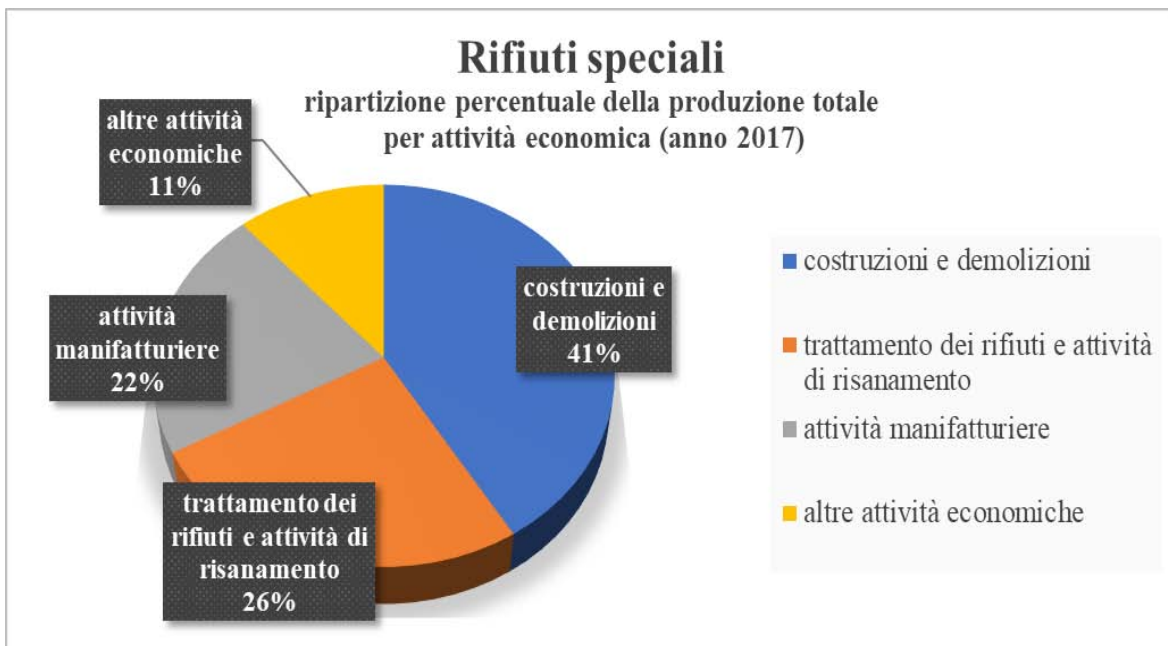


Figura 1.4: Ripartizione percentuale della produzione totale di rifiuti speciali, per attività economica, relativamente all'anno 2017 ⁽¹²⁾.

Come si evince facilmente dal grafico, l'apporto maggiore deriva generalmente dalle attività di costruzione e demolizione, ma non è trascurabile nemmeno la produzione di rifiuti dovuta ad attività di trattamento degli stessi.

Un'ulteriore classificazione dei rifiuti viene effettuata secondo le caratteristiche che portano a distinguere i 'rifiuti pericolosi' da quelli 'non pericolosi'.

Per rifiuto pericoloso si intende qualsiasi rifiuto che possa essere etichettato con almeno uno tra i seguenti appellativi: infiammabile, facilmente infiammabile, comburente, esplosivo, irritante, tossico, nocivo, cancerogeno, infettivo, corrosivo, sensibilizzante, mutageno, ecotossico per i comparti ambientali o tossico per la riproduzione umana. Appartengono a questa categoria anche tutti i prodotti che sprigionano gas tossico o molto tossico a contatto con aria, acqua o un acido, nonché materiali che possano subire modificazioni dopo l'eliminazione, dando prodotti con almeno una delle caratteristiche appena riportate.

Si considerano come rifiuti non pericolosi, tutti quelli che non rientrano nella categoria dei pericolosi.

Tuttavia queste classificazioni non sono sufficienti per comprendere come venga gestito il flusso dei rifiuti. Le direttive comunitarie e lo stesso D. Lgs 152/2006 puntano alla promozione di una sempre maggiore attività di raccolta differenziata e riciclaggio. Risulta quindi utile approfondire quali siano, in quest'ottica, i criteri di differenziazione dei rifiuti.

1.3.2 Tipologie specifiche di rifiuti destinati ad impianti dedicati di smaltimento e recupero

Nel D. Lgs. 152/2006, si definisce quella che è comunemente nota a tutti come ‘raccolta differenziata’ ossia l’insieme di operazioni di cernita e prelievo dei rifiuti, che si effettuano tenendo separati i materiali a seconda di tipologia e loro natura. Ciò ha la finalità di renderne più facile il trattamento specifico. In questo modo, quindi, si ottiene un’ulteriore classificazione dei rifiuti. Le frazioni merceologiche comunemente raccolte in ambito civile sono:

- Carta
- Metalli
- Plastica
- Vetro
- Organico

In aggiunta a questi, dove possibile viene spesso raccolto anche il legno.

I materiali differenziati giunti presso lo stabilimento di selezione, subiscono un’ulteriore selezione a seconda delle caratteristiche e dello stato di conservazione del materiale. Così ad esempio la carta viene ulteriormente suddivisa in cartone, carta di qualità, carta mista e scarti; i materiali metallici vengono separati a seconda che siano di ferro o alluminio; la plastica segue trattamenti simili ma su linee diverse a seconda del materiale di cui è composta e si separano quindi il polietilentereftalato, dal polietilene ad alta densità e dalle poliolefine.

Nel 2017 la raccolta differenziata dei rifiuti urbani in Italia ha raggiunto il 58.1% della produzione nazionale, che in tonnellate equivale a 17.5 Mton di rifiuti.

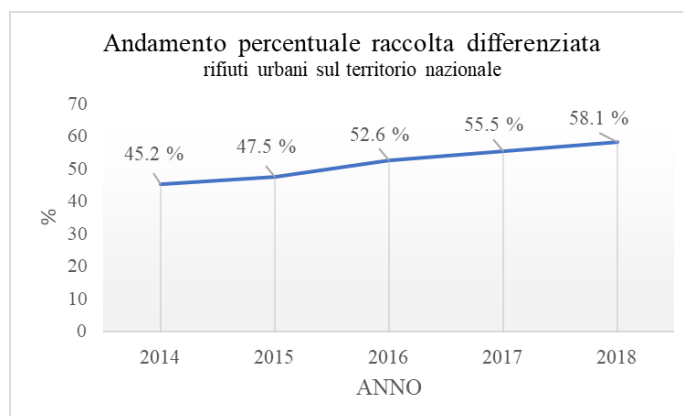


Figura 1.5: andamento della percentuale di raccolta differenziata registrata su base nazionale nel periodo di tempo 2014-2018 ⁽⁹⁾

Nel 2018, il 54.1% dei comuni ha conseguito percentuali di raccolta differenziata pari o superiore al 65%. In generale le percentuali sono in continuo aumento in tutto il territorio nazionale. [9]

La frazione merceologica maggiormente raccolta è rappresentata dall'organico, a seguire si trovano (in ordine) carta, vetro plastica, legno e metallo.

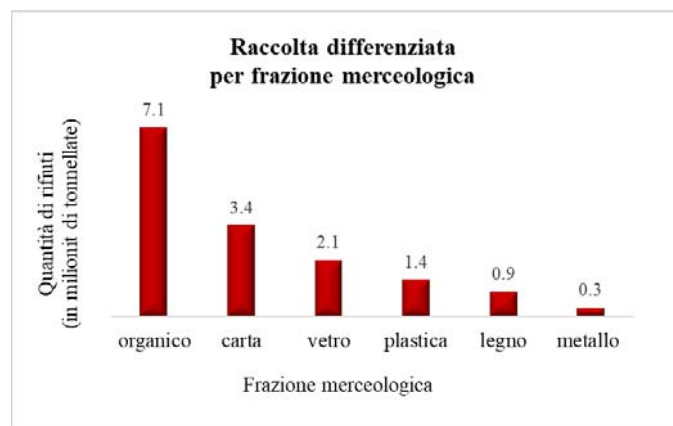


Figura 1.6: quantità (in peso) di rifiuti raccolti dalla raccolta differenziata a seconda della tipologia di materiale, in Italia nel 2018⁽⁹⁾

Oltre alle principali frazioni elencate esistono anche altre categorie che raccolgono separatamente gli ingombranti, apparecchi RAEE (Rifiuti Di Apparecchiature Elettriche Ed Elettroniche), materiali tessili, rifiuti derivanti dallo spazzamento delle strade, da attività di costruzione e demolizione.

Di seguito si riporta un grafico che illustra la ripartizione percentuale delle modalità di gestione dei rifiuti urbani, relativamente ai dati raccolti nel 2018. [9]

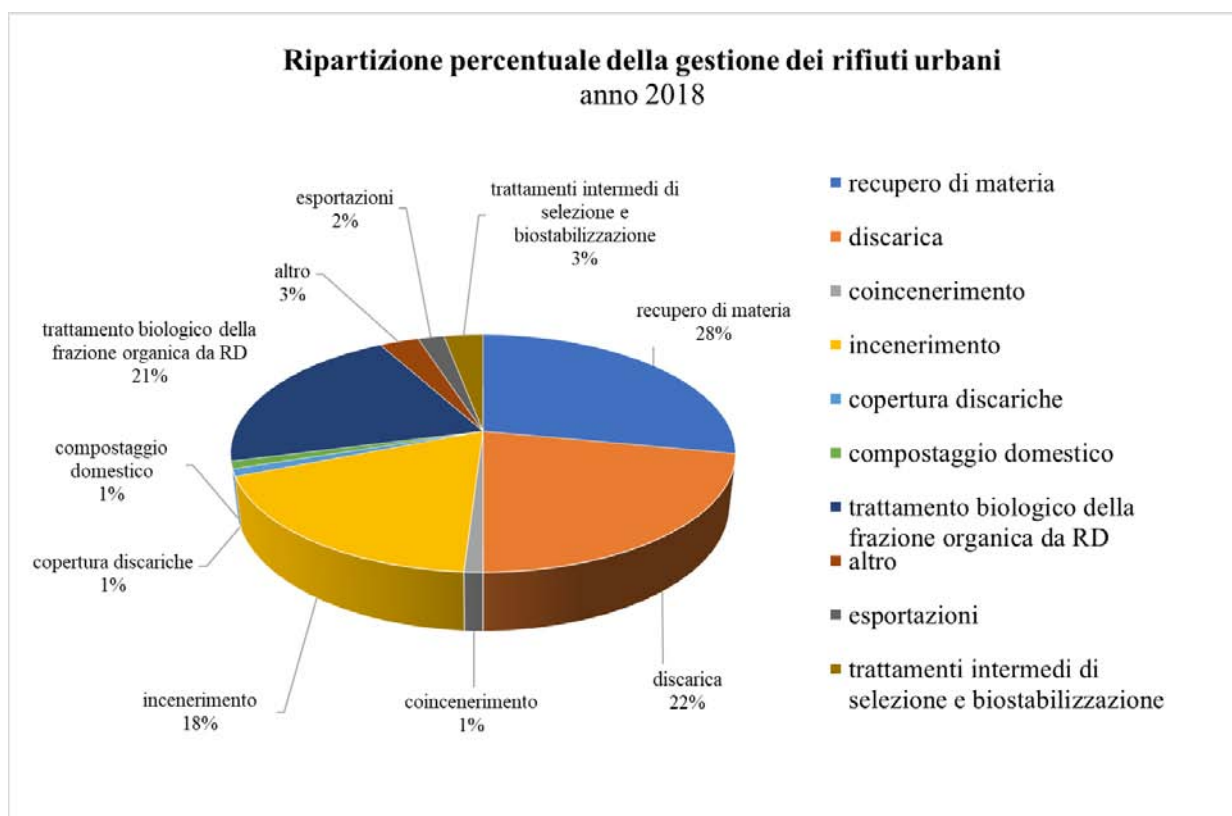


Figura 1.7: Ripartizione percentuale delle modalità di gestione dei rifiuti urbani in Italia nel 2018⁽⁹⁾

In totale, nel 2018, sono risultati operativi 646 impianti di gestione dei rifiuti urbani. [9]

Per quanto concerne i rifiuti speciali invece, sono 147.1 milioni le tonnellate gestite nel 2018, di cui il 93.5% del totale costituito da rifiuti non pericolosi e il restante 6.5% da rifiuti pericolosi [12]. In questo caso la gestione è un po' più complessa e per approfondirla sarebbe necessario fare una divagazione eccessiva. Pertanto, si ritiene sufficiente passare direttamente alla rappresentazione della ripartizione percentuale della gestione dei rifiuti speciali relativamente al 2017. A titolo esemplificativo, si riportata di seguito il grafico (§Fig. 1.7)

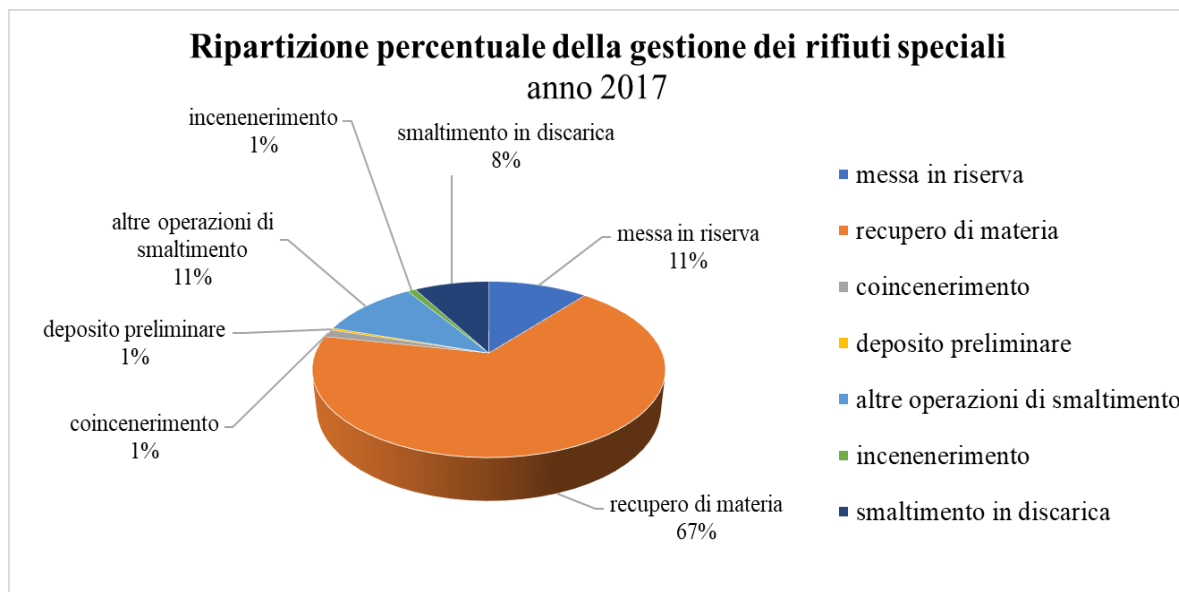


Figura 1.8: ripartizione percentuale delle modalità di gestione dei rifiuti speciali in Italia nel 2017⁽¹²⁾

1.3.3 Le frazioni plastiche polimeriche: alcuni dati su produzione e smaltimento

La plastica è un materiale talmente versatile da trovarsi impiegato, seppur in diverse forme, praticamente ovunque. Prodotti fabbricati in plastica vengono utilizzati ampiamente in ambito domestico, industriale e agricolo, nonché nel settore delle costruzioni. Non mancano applicazioni anche nei settori dell'abbigliamento e delle attrezzature sportive. Fondamentale l'uso nel campo sanitario e dell'ingegneria biomedica. Non sono da trascurarsi nemmeno l'impiego nei comparti dell'elettronica e dell'*automotive*. Ma il maggior utilizzo trova applicazione nella creazione di imballaggi per oggetti o cibo, molto spesso con il fine di assicurare alle merci un trasporto sicuro e una migliore conservazione. La sua versatilità e il largo impiego si spiegano innanzitutto con le caratteristiche di resistenza e durevolezza, comuni a tutti i tipi di plastiche. A queste si uniscono ridotto peso specifico, facile lavorabilità e modellabilità (la possibilità di dare al materiale plastico qualsiasi forma e colore). Inoltre il

materiale plastico ha buone proprietà isolanti e impermeabilizzanti. I prodotti in plastica risultano naturalmente infrangibili e sono più resistenti all'usura.

I vantaggi dell'utilizzo della plastica sono evidentemente molti, ma a decretare un impiego così esteso è sicuramente l'aspetto economico. Il processo di lavorazione della plastica è completamente industrializzato e, già da molti anni, costituisce uno dei principali pilastri della produzione di massa. Ne deriva che è possibile vendere il prodotto finito ad un costo molto basso, accessibile a tutti, sdoganando di fatto l'utilizzo della plastica a qualsiasi livello.

Tutto ciò trova conferma nelle statistiche: i numeri di produzione, utilizzo e smaltimento della plastica sono decisamente elevati.

Secondo il report pubblicato da PlasticsEurope (Association of Plastics Manufacturers) ed EPRO (European Association of Plastics Recycling and Recovery Organisations), nel 2017 la produzione mondiale di plastica ha quasi raggiunto 350 Mton [2]. Nello specifico, la parte da ascrivere al continente Europeo ammonta a circa 65 Mton. Si tratta di cifre notevoli soprattutto se si considera che sono esclusi dal conteggio i materiali in PET (polietilentereftalato) comunemente impiegati nella produzione di bottiglie e contenitori per liquidi, in PA (poliammidi) e le fibre poliacriliche.

Il report include inoltre i dati sulla distribuzione mondiale della produzione di plastica. Circa la metà (il 50.1%) viene prodotto in Asia, dove il maggior produttore è la Cina, responsabile del 29.4% della produzione; seguono il Giappone (3.9% della produzione) e le restanti regioni asiatiche (16.8%). In seconda posizione tra i maggiori produttori mondiali di plastica troviamo l'Europa, responsabile di circa il 18.5% del totale mondiale. Tale offerta si spiega con richiesta molto importante. Infatti, dalle elaborazioni [2] di PlasticsEurope emerge che il 70% della domanda europea proviene da solo sei Stati che, elencati in ordine decrescente di quantità d'impiego, sono: Germania, Italia, Francia, Spagna, Regno Unito e Polonia. Sempre stando al report di PlasticEurope, circa il 40% della plastica utilizzata nel 2017 è stata impiegata per la creazione di imballaggi, a seguire il 20% circa è stato impiegato nelle costruzioni e il 10% nel settore dell'*automotive*. Il restante 30% è stato utilizzato in vario modo nel settore dell'elettronica, nella produzione di beni per il tempo libero, lo sport o la casa, in agricoltura e, in parte minore, nell'ingegneria meccanica o biomedica.

Ai fini del presente elaborato, questi dati sulla produzione e l'utilizzo dei materiali plastici sono importanti nell'ottica della gestione del prodotto al termine del suo utilizzo. Come si evince da quanto appena riportato, la maggior parte della plastica viene impiegata negli imballaggi che - come è noto - hanno un tempo di vita molto breve e sono rapidamente scartati dalle persone. Inoltre, la tendenza ad oggi è quella di imballare sempre più articoli, con pezzatura via via di dimensioni minori. Aumenta quindi il volume ma non la durata di vita degli imballaggi. Tuttavia, quello che dall'utilizzatore viene visto come rifiuto conserva ancora molto potenziale e, se correttamente conferito, può essere destinato a seconda vita.

Alla luce di questa consapevolezza si è fatto molto negli ultimi due decenni per passare da un uso sconsiderato e poco responsabile della plastica ad un atteggiamento più consapevole.

In Italia, analizzando il decennio che va dal 2006 al 2016, il riciclo degli imballaggi in plastica derivanti dai comparti domestici, industriali e commerciali è aumentato del 41%, il recupero di energia è aumentato di circa il 52%, mentre il conferimento in discarica è diminuito del 66%.

Nel 2016 sono stati raccolti 2.2 milioni di tonnellate di imballaggi plastici post-consumo e circa 0.9 milioni di tonnellate sono state inviate a riciclo.

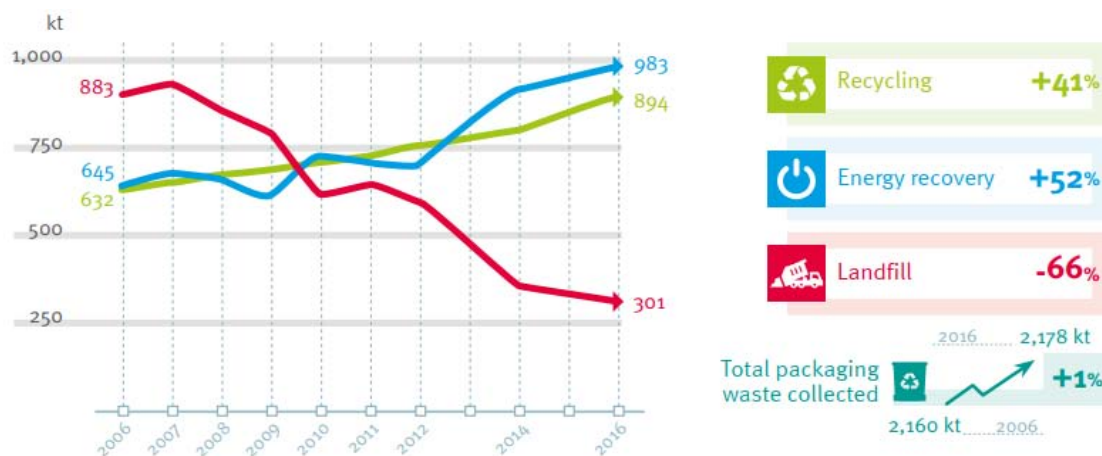


Figura 1.3: Evoluzione dello smaltimento degli imballaggi in plastica in ITALIA nel periodo 2006-2016⁽²⁾

Fortunatamente una tendenza analoga è stata registrata anche per quanto riguarda lo smaltimento dei prodotti in plastica (imballaggi esclusi). Il volume dei rifiuti in plastica destinati al riciclo è aumentato di circa il 46%, le operazioni di recupero energetico sono aumentate del 53% e il conferimento in discarica è diminuito del 49%.

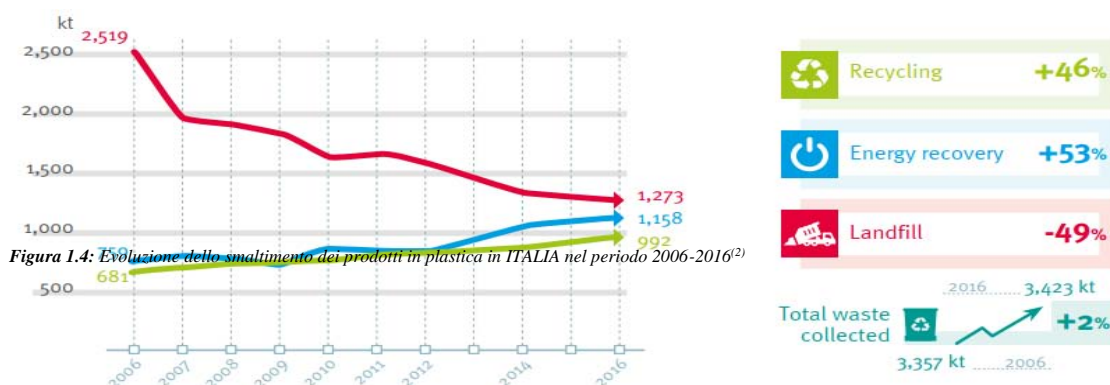


Figura 1.4: Evoluzione dello smaltimento dei prodotti in plastica in ITALIA nel periodo 2006-2016⁽²⁾

Questi dati, assieme alle considerazioni sul basso costo dei prodotti e il consumo di massa, servono per dare un'idea delle enormi quantità di materie in plastica che ogni anno vengono

prodotte e poi scartate. Tutto ciò evidenzia quale sia l'entità in termini di numeri, frequenza e quantità che caratterizza i processi di recupero, gestione e stoccaggio per consentire il riciclo della plastica.

Questi aspetti hanno un'influenza elevata principalmente in termini probabilistici rispetto all'evento 'incendio di rifiuti'. Per il caso studio in esame, selezionando depositi di stoccaggio di materie plastiche non si sta andando ad indagare un caso di nicchia ma una realtà consolidata su tutto il territorio nazionale.

In aggiunta a queste ragioni, occorre specificare che la scelta tra i vari materiali elencati è ricaduta proprio su quelli del primo gruppo anche in ragione di un altro aspetto fondamentale, che si lega invece all'entità del danno prodotto. A causa delle sue caratteristiche chimiche, la combustione delle sostanze plastiche risulta particolarmente gravosa per la popolazione esposta ai fumi dell'incendio. Ancora una volta quindi si conferma importante adottare come rappresentativa la matrice costituita da materiali plastici polimerici e indagarne la dinamica di sviluppo in caso di incendio.

1.4 Prodotti di combustione [3][4][5]

Restringendo l'analisi agli incendi in ambiente aperto, caratterizzati pertanto da disponibilità pressoché illimitata di ventilazione, si può ipotizzare che la combustione abbia decorso completo. Tuttavia tale eventualità non è sempre confermata nel senso che questi scenari sono accompagnati da liberazione di prodotti di combustione incompleta. A tal riguardo si consideri che la combustione di una matrice complessa non è generalmente un processo omogeneo e la presenza di additivi o comunque di eterogeneità nella matrice determinano meccanismi particolari di combustione. Dal punto di vista pratico, le diverse rese di combustione a specifici prodotti sono molto sensibili alla particolare matrice ma anche al contesto entro il quale avviene la combustione.

In linea generale, la combustione di una matrice di rifiuto produce:

- fuliggine (*soot*) che incide sul carico dei fumi e dunque sulla relativa visibilità
- prodotti nocivi e/o tossici
- *char* ovvero residuo post-combustione

Il prodotto di combustione più facilmente riscontrabile è sicuramente il fumo, una dispersione che può essere anche molto densa e scura nel caso di combustione incompleta (dovuta ad esempio alla presenza di umidità, alle basse temperature o alla scarsità di comburente). In questo caso i fumi contengono un'alta percentuale di particolato, ovvero una frazione di particolato solido (composto prevalentemente da sostanze carboniose) derivanti da meccanismi di ossido-riduzione e decomposizione termica. A destare particolare preoccupazione sono le

polveri aventi diametro aerodinamico⁴ inferiore a 10µm, le cosiddette PM10. Tra queste una frazione preponderante è rappresentata dalle PM2.5 che hanno dimensioni tali da poter essere inalate e veicolate alle basse vie respiratorie di un *target* umano. La porzione fumosa dispersa porta con sé anche altre sostanze, diverse a seconda del combustibile e delle condizioni in cui avviene la reazione. Per capire meglio l'influenza della natura del combustibile si prenda ad esempio il PVC, la cui combustione si differenzia rispetto alle altre più comuni perché accompagnata dal rilascio di acido cloridrico; ciò è dovuto al fatto che nel polimero di partenza sono presenti atomi di cloro. Per il secondo aspetto, relativo alle condizioni di reazione, si prenda invece come esempio il caso frequente in cui un incendio interessa un composto di natura carboniosa (ovvero un materiale contenente un'alta percentuale di atomi di carbonio). In questo caso si avrà solo rilascio di anidride carbonica se avviene una combustione perfetta; nel caso contrario di combustione parziale si avrà, invece, anche l'emissione di una frazione di monossido di carbonio.

Nel caso di matrici di rifiuti non è infrequente inoltre rilevare la presenza di altre sostanze nei prodotti della loro combustione. Tra queste si annoverano:

1.4.1 Diossine e furani

Spesso con il termine generico “diossine” si indica un gruppo di 210 composti chimici che comprende sia le diossine vere e proprie (75 congeneri) che i furani (135 congeneri). Ad accumularli il fatto di essere tutti composti aromatici poli-clorurati. Di questi però, solo alcuni comportano una particolare attenzione per la potenziale pericolosità nei confronti di uomo e ambiente. Si tratta di 17 specie in totale, 7 congeneri della famiglia delle diossine e 10 della famiglia dei furani. Il TCDD (2,3,7,8-tetracloro-dibenzo-p-diossina) è il principale perché riconosciuto come possibile cancerogeno nonché caratterizzato da spiccata proprietà di persistenza. Se sviluppate durante una combustione, infatti, le diossine non subiscono degradazione chimica ma si riversano nell'ambiente dove, data la loro elevata stabilità, persistono per molto tempo. PCDD e PCDF sono semivolatili e possono essere presenti nella matrice aria sia in fase vapore che come particolato. Insolubili in acqua, le diossine e i furani sono invece altamente solubili nei grassi. Per questo motivo, una volta nel suolo non vengono dilavate ma piuttosto ingerite da animali, entrando quindi nella catena alimentare umana. Se i prodotti di derivazione animale contaminati vengono ingeriti dall'uomo, gli inquinanti vengono trasferiti e accumulati nei tessuti adiposi, dando così avvio al processo di biomagnificazione⁵. Nel contesto di un incendio, la presenza di tali composti può dunque comportare un'esposizione acuta diretta con la presenza del *target* durante lo scenario oppure cronica indiretta, a seguito della ricaduta dei fumi e successiva ingestione.

⁴ Diametro aerodinamico: diametro di una particella sferica di densità unitaria (1 g/cm³) avente comportamento aerodinamico uguale a quello della particella in esame.

⁵ Biomagnificazione: processo mediante il quale la concentrazione di un inquinante nei tessuti biologici degli organismi viventi aumenta man mano che si sale nella catena trofica ⁽⁶⁾.

Le diossine si sviluppano spesso come prodotto indesiderato durante la combustione non controllata di rifiuti misti contenenti materie plastiche o in generale composti clorurati (come ad esempio il PVC-polivinilcloruro), ma anche di materiali eterogenei quali rifiuti urbani, pneumatici, resine termoplastiche, legno trattato, metalli, tessuti sintetici o pellami. Secondo uno studio condotto dall'Unione Europea nel 2001⁽³⁾, una delle principali cause di contaminazione del suolo da diossine è proprio la combustione incontrollata e accidentale.

1.4.2 Policlorobifenili (PCB)

I policlorobifenili sono composti aromatici costituiti da molecole di bifenile aventi atomi di idrogeno cloro-sostituiti. Sono molto stabili, di natura idrofoba ma solubili nei grassi. Hanno cambiamento di fase a temperature superiori a circa 800°C ma subiscono decomposizione solo dopo aver superato i 1000 °C. Alcuni congeneri particolari presentano delle caratteristiche chimico-fisiche e tossicologiche che li rendono paragonabili alle diossine e per questo molto pericolosi per l'uomo e l'ambiente. In passato sono stati molto utilizzati come additivi per antiparassitari e pesticidi, adesivi e sigillanti, ritardanti di fiamma, isolanti termici ed elettrici, vernici, fluidi dielettrici nei trasformatori. Dal 1985 ne è vietato l'uso e la commercializzazione. Il monitoraggio delle emissioni da incendio può includere anche questa classe di composti dal momento che potrebbe rappresentare un sottoprodotto, specie in condizioni non controllate e non favorevoli.

1.4.3 Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)

Gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) sono composti organici formati da una serie di anelli aromatici, generalmente in numero variabile da 2 a 7, talvolta addizionati di gruppi funzionali. A temperatura ambiente si presentano allo stato solido, ma durante la combustione ad alte temperature si liberano in atmosfera in forma di composti gassosi. Gli IPA con struttura contenente fino a quattro anelli tendono a rimanere in forma gassosa una volta immessi in aria, salvo poi iniziare a degradarsi nell'arco di 24 ore. Nel periodo invernale invece, tendono ad essere inglobati stabilmente nelle particelle di fuliggine. Quest'ultimo comportamento caratterizza sempre gli IPA con struttura formata da quattro o più anelli. È proprio questo aspetto a rendere gli IPA pericolosi: dal momento che molte particelle di fuliggine presentano dimensioni tali da poter essere inalate, gli idrocarburi policiclici sono veicolati attraverso i polmoni direttamente nell'organismo umano. Inoltre, gli IPA hanno caratteristiche lipofile, stabilizzandosi nelle matrici grasse e, data la loro stabilità, tendono ad accumularsi nei sistemi biologici. La preoccupazione data da questi composti è molto alta a causa delle loro riconosciute proprietà cancerogene e mutagene.

1.4.5 Altri prodotti ed effetti sulla salute

Di seguito si riporta inoltre un elenco di sostanze specifiche, non meno importanti, che comunemente si sviluppano dalla combustione. Alcune sostanze sono comuni a molte emissioni, altre invece sono tipiche di particolari materiali.

Per ogni emissione si sono riportate brevemente le caratteristiche essenziali.

Sostanza	Eventuali note
Anidride carbonica CO₂	Gas che si forma in tutti i processi di combustione e decomposizione di materiale organico per ossidazione totale del carbonio. Incolore e inodore, è noto per le sue proprietà asfissianti. Provoca irritazione a naso e gola; è riconoscibile altresì per il sapore acidulo che crea in bocca. Facilmente assorbibile per via inalatoria, è inoltre in grado di provocare un'accelerazione del ritmo respiratorio. Concentrazioni in aria pari a circa il 3% possono portare al raddoppio della frequenza respiratoria con la conseguenza di facilitare l'immissione di altre sostanze nocive nell'organismo. Concentrazioni attorno al 10% di CO ₂ in aria possono risultare letali anche per esposizione acuta.
Monossido di carbonio	Si produce dalla combustione incompleta di materiale organico o da incendi covanti, quindi in generale è determinato da un contesto di carenza di ossigeno. È un gas incolore e inodore. L'esposizione ad alte concentrazioni causa tossicità acuta. Inalato e assorbito attraverso i polmoni, il monossido di carbonio presenta un'affinità 250 volte superiore a quella dell'ossigeno; perciò si lega all'emoglobina e causa stati di anossia. [31] L'esposizione a percentuali di CO pari a 0,15% per la durata di 1 ora o pari a 0,05% per almeno 3 ore può causare decesso. Inalare aria con 0,4% di CO risulta fatale per la vita umana in meno di 1 ora. [30]
Anidride solforosa SO₂	Può svilupparsi dalla combustione di petrolio o carbone contenenti zolfo. È un gas incolore con caratteristico odore pungente. Se veicolata da materiale particolato può andare oltre le cavità nasali, entrando nell'apparato respiratorio [31]. È un gas irritante e può colpire le mucose di occhi e vie respiratorie già in concentrazioni minime. Si riporta irritazione alle mucose oculari per esposizioni pari a 8-10 ppm e irritazione a naso e gola, con tosse e difficoltà respiratorie per brevi esposizioni a concentrazioni pari a 50 ppm. [34] Generalmente si forma in quantità limitate ma come visto è pericoloso anche a basse esposizioni. Le patologie scatenate sono spesso bronchiti, asma, tracheiti o irritazioni alla pelle, occhi e mucose. [30] Generalmente non è riscontrata nell'incendio di rifiuti, di qualsivoglia origine.
Ammoniaca	Si forma e viene rilasciata durante incendi di materiali contenenti azoto come ad esempio resine acriliche, fenoliche o melamminiche, ma anche dalla combustione di lana e seta. Gas incolore con odore pungente. Può essere assorbita attraverso le vie respiratorie; ha effetti corrosivi su occhi e vie respiratorie. [19]

		Un'esposizione di circa 30 minuti all'aria contenente circa lo 0,25-0,65% di ammoniacale può provocare danni molto gravi all'organismo umano, talvolta anche irreversibili come la morte. [30]
Acido cloridrico	HCl	Gas incolore caratterizzato da un odore pungente. Può svilupparsi durante la combustione di materiali che contengono cloro come polimeri clorurati (PVC). È caratterizzato da una tossicità notevole, risulta irritante per le mucose di occhi e vie respiratorie con particolare riferimento ai polmoni. Una concentrazione di 1500 ppm è fatale in pochi minuti [30] ma concentrazioni pericolose per la salute sono state rilevate già per esposizioni a 50 ppm. [34]
Idrogeno solforato	H₂S	Si sviluppa durante i processi di combustione che interessano materiali contenenti zolfo, quali ad esempio lana, pelli, gomme, carne e capelli. Data la sua caratteristica di insolubilità, riesce ad attraversare le vie respiratorie ed entrare in circolo nell'organismo. Incolore e tossico per l'uomo, presenta un caratteristico odore sulfureo (tipo di uova marce) che tuttavia diventa impercettibile già dopo le prime inalazioni. L'idrogeno solforato infatti, già a bassissime concentrazioni, inibisce i recettori olfattivi rendendo di fatto impossibile identificarne la presenza. Questo ha delle evidenti ripercussioni sulla salute umana e sulla sicurezza delle persone che dovrebbero trarsi in salvo non appena possibile ma che invece rischiano di non percepire il pericolo. Concentrazioni di H ₂ S in aria pari a 0,04-0,07% inalate per circa 30 minuti o più possono dare vertigini e vomito; se le percentuali sono superiori, l'H ₂ S può colpire il sistema nervoso portando a perdita della coscienza e blocco della respirazione. [30],[32]
Ossido di azoto (o monossido di azoto)	NO	Analogamente all'anidride solforosa, si genera nei processi di combustione che interessano combustibili fossili contenenti azoto e comburente aria. È un potente ossidante che causa danni cellulari del DNA con morte cellulare e attivazione del sistema immunitario. [32]
Biossido di azoto	NO₂	Si genera nelle reazioni di combustione in condizioni analoghe a quelle descritte per NO, oppure durante reazioni di combustione di nitrati organici, nitrocellulosa e nitrati di ammonio [30]. Altamente tossico e irritante per le vie respiratorie e i polmoni. Possono essere mortali in poco tempo anche esposizioni all'aria in concentrazioni di NO ₂ pari a 0.02% o 0.07%
Fosgene	COCl₂	Può svilupparsi nella combustione di alcuni materiali plastici contenenti cloro. È altamente tossico. Il fosgene in presenza di acqua reagisce scindendosi in ossido di carbonio e acido cloridrico [30]. A concentrazioni molto basse (4 ppm) causa irritazione oculare con disturbo reversibile e irritazione alle vie aeree; tuttavia può causare danni polmonari anche a concentrazioni minori in caso di esposizioni acute. [34]

Acido cianidrico	HCN	È un composto estremamente tossico che si sostituisce all'ossigeno nel trasporto impedendo la respirazione. Sono da considerare mortali concentrazioni pari allo 0,03%. Si forma in quantità minime dalla combustione spesso incompleta di legno, di resine acriliche e poliammidiche, da materiali poliuretanicici o tessuti di origine naturale come lana e seta. [30]
Aldeide acrilica	C₃H₄O	È un gas altamente tossico e irritante. Viene rilasciata durante la combustione di prodotti derivati dal petrolio o di resine amminoplastiche, poliammidiche e poliuretaniche. I vapori causano irritazione agli occhi a partire da concentrazioni pari a 0.15 ppm in su; concentrazioni pari o superiori a 1 ppm causano seri fastidi e lacrimazioni agli occhi e non possono essere tollerati per più di 4-5 minuti. Se inalato concentrazioni pari a 1.2 ppm per esposizioni di 5 secondi risultano altamente irritanti per tutte le mucose, mentre dopo 2 minuti a concentrazioni pari a 1.7 ppm risulta altamente doloroso per la rinofaringe. Concentrazioni superiori ai 10 ppm possono risultare mortali. [30]
Formaldeide	CH₂O	Allo stato puro si presenta come un gas incolore con un odore pungente. Molto utilizzata nell'industria plastica (per la produzione di resine) e nell'industria tessile. Fortemente idrosolubile, è dannosa per le mucose nasali - tanto da essere stata inserita dall'IARC (International Agency Research on Cancer) tra le possibili sostanze cancerogene – ma anche per le vie respiratorie superiori e gli occhi [31]. Si libera a seguito di combustioni che interessano materiali trattati con resine di cui è un precursore o la combustione di laminati plastici o truciolati, isolanti termici e acustici, pannelli usati nei controsoffitti o nei tramezzi, prodotti per i quali è stata utilizzata formaldeide durante la produzione iniziale.
Acetaldeide	CH₃CHO	A temperatura ambiente si trova allo stato liquido con spiccate caratteristiche di volatilità e infiammabilità. Relativamente a processi di incendio, può liberarsi in atmosfera a seguito della combustione incompleta del legno oppure può derivare anche da emissioni rilasciate da impianti di trattamento dei rifiuti. Riconoscibile per via del suo odore pungente, è stato inserito dallo IARC nel gruppo 2B come 'possibile' agente cancerogeno per l'uomo. Se inalato può causare irritazione a occhi, pelle (eritemi, necrosi cellulare) e vie respiratorie (tosse, edema polmonare). In concentrazioni elevate può portare a paralisi respiratoria e morte. [35]
Acido benzoico	C₇H₆O₂	In condizioni a temperatura ambiente si trova allo stato solido in forma di polvere o granuli. Si forma in gran quantità dalla combustione del PET. Se inalato può causare tosse e mal di gola. È inoltre un irritante per occhi, epidermide e vie respiratorie. [19]

Ciclopentano	C₅H₁₀	Tra i principali effetti derivanti da un'esposizione acuta si riscontrano: possibile irritazione e disturbi del sistema nervoso centrale. Sembra che l'irritazione delle mucose dei bulbi oculari si verifichi solo a seguito di esposizioni a concentrazioni elevate, tuttavia non sono ancora stati condotti test specifici e non esiste una soglia ben definita. [35]
Caprolattame	C₆H₁₁NO	Può generarsi dalla combustione di poliammidi ed in tal caso emette fumi e gas irritanti, tossici per l'organismo umano. Se inalato può provocare tosse, mal di testa, crampi addominali, vertigini e stato confusionale. Oltre che irritazione cutanea, può creare forte irritazione oculare, con arrossamento e dolore. Può provocare effetti sul sistema nervoso centrale. [19]

1.5 Aspetti ambientali e sanitari. Impatti su ecosistema e uomo

I composti organici che presentano caratteristiche di alta stabilità e persistenza, una volta nell'ambiente, vi risiedono per molto tempo, potendo essere trasferiti da una matrice all'altra. Possono risiedere nel terreno o essere trasportati a lunga distanza da aria e acqua. Stando a quanto riportato dall'ECHA [7], un apporto non trascurabile al trasporto di inquinanti organici persistenti è dato anche dall'ingestione da parte di animali appartenenti a specie migratorie, che veicolano le sostanze inquinanti anche a cavallo di diverse parti del mondo.

Ciò che rende questo tipo di inquinanti altamente pericolosi è il fatto che sono in grado di alterare l'equilibrio dei vari ecosistemi già a concentrazioni molto basse.

L'organizzazione mondiale della sanità (WHO – World Health Organization) ha richiamato sensibilmente l'attenzione sull'impatto che i POPs (Persistent Organic Pollutants) hanno sull'ambiente e la salute umana. Molti degli studi svolti hanno dimostrato l'associazione tra esposizione a queste sostanze e insorgenza di cancro, problemi riproduttivi, disordini neurocomportamentali, anomalie nello sviluppo fetale, alterazioni del sistema immunitario e del sistema ormonale. [8]

A sollevare particolare attenzione anche la combustione di sostanze contenenti i metalli pesanti i quali possono essere rilasciati nelle varie matrici ambientali e quindi poi assorbiti all'organismo. Il fenomeno può indurre anche intossicazione acuta, la gravità dipende dalla tipologia di metalli, dalla durata dell'esposizione ma anche dalla suscettibilità genetica individuale. [8]

Molti metalli pesanti sono stati classificati dallo IARC (Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro) come possibili agenti cancerogeni o agenti cancerogeni certi. Gli elementi più tossici sono: arsenico (As), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), rame (Cu), mercurio (Hg), manganese (Mn), nickel (Ni), piombo (Pb) e il tallio (Tl). La maggior parte di questi sono

classificati come tossici per: il sistema centrale nervoso (Hg, Pb, As), fegato e reni (Hg, Pb, Cd, Cu), pelle, ossa e denti (Ni, Cd, Cu, Cr). [8]

Un numero sempre maggiore di evidenze mostra che i metalli sono in grado di agire come agenti cancerogeni secondo diversi meccanismi [8] (effetto mutageno e cancerogeno, modulazione epigenetica di espressione dei geni, sviluppo di malattie estrogeno-dipendenti tra cui tumori al seno e all'endometrio).

Come si vedrà più avanti, nel presente elaborato sono presi in considerazione solo materiali che non contengono metalli tralasciando dunque tale aspetto, raccomandandolo per future ulteriori investigazioni. Tuttavia, si è ritenuto necessario approfondire questo aspetto che risulta invece di fondamentale rilevanza ai fini della sicurezza delle persone in un caso di incendio reale.

1.6 L'approccio al lavoro

Nel presente capitolo sono state elencate e prese in considerazione le principali problematiche legate al fenomeno della combustione dei rifiuti, facendo un *excursus* di carattere generale sull'evoluzione storico-normativa e sulle principali criticità correlate.

Di seguito, si abbandona questo approccio generalizzato a favore di una trattazione più peculiare. Nel prosieguo del lavoro l'attenzione verrà settorializzata su una categoria specifica di rifiuti, così da poter approcciare lo studio con un congruo livello di accuratezza. Restringere l'area d'indagine ha permesso di conoscere meglio i limiti del campo di applicazione scelto e di aumentare il grado di dettaglio della trattazione.

Le scelte che hanno guidato la selezione sono fondate su ragionamenti rigorosamente tecnici e oggettivi, volti a identificare aspetti come maggiore probabilità di accadimento (es. quale matrice può essere più frequentemente interessata da incendio) e maggiore gravità (es. quale matrice, se interessata da combustione, produce gli effetti più gravosi sui *target* sensibili).

Nel capitolo seguente, si descrive quindi quali siano state queste scelte, le motivazioni che hanno guidato la selezione e gli obiettivi sensibili sui quali è stata posta l'attenzione.

Seguirà anche una trattazione sugli aspetti tecnico-scientifici dell'evento 'incendio'. (§Cap. 3)

A tal proposito, si anticipa fin da subito che si è deliberatamente scelto di considerare solo i casi in cui l'evento avvenga casualmente in depositi di rifiuti all'aperto.

Infine, com'è noto, tutti i dati selezionati sono stati implementati ad un programma di calcolo. Anche in questo caso, gli *input* utilizzati sono stati opportunamente descritti e giustificati. (§Cap. 4)

Capitolo 2

Il ciclo dei rifiuti, matrici plastiche e combustibili

Nel presente capitolo viene affrontato il tema del ciclo dei rifiuti. Particolare attenzione viene posta alle principali matrici che andranno a rappresentare larga parte di materiali rilevati negli stabilimenti di trattamento, manipolazione e stoccaggio di rifiuti. Tra questi, i materiali plastici, tra i quali sono selezionate le matrici utilizzate per l'attività di modellazione degli incendi.

2.1 Il ciclo dei rifiuti

La forte presa di coscienza verso le tematiche di salvaguardia ambientale ha cambiato il modello di produzione di beni, utilizzo delle risorse e gestione del fine vita. Si è passati da un approccio lineare ad uno di economia circolare. Nel primo caso, risorse energetiche e materie prime sono considerate fonte inesauribile di cui è possibile disporre senza alcuna accortezza. La produzione di beni avviene utilizzando materie prime vergini e il prodotto, dopo aver assolto alla sua funzione, viene gettato via.

Nel modello di economia circolare, invece, si pone molta attenzione a tutte le fasi di vita del prodotto, cercando di incentivarne il riutilizzo e il riciclo, a discapito dello scarto diretto. Per favorire questo circolo virtuoso sta consolidandosi sempre più l'usanza di pensare, già nella fase di progettazione, a quale sarà la possibile 'seconda vita' del prodotto o dei materiali che lo compongono. Si parla di *ecodesign* ed è un aspetto molto importante anche nell'ottica di ottimizzare il riciclo.

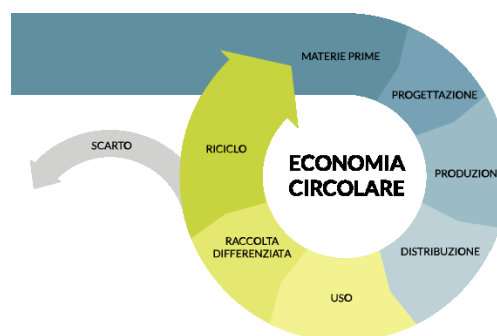


Figura 2.1: schema rappresentativo del modello di economia circolare⁽¹⁴⁾

La Figura 2.1 rappresenta in modo schematico le varie fasi di questo modello circolare di economia. Osservandola è possibile seguire il percorso che compie un prodotto ricavato da materie prime ed immesso sul mercato. Dopo la raccolta differenziata si compiono le operazioni di riciclo che trasformano gran parte del materiale post-consumo in materia prima secondaria, ossia in un prodotto equiparabile alla materia prima vergine e che può essere rimesso nel mercato con le stesse funzionalità.

Il passaggio è avvenuto quando si è concretizzato che un anche un prodotto post-consumo conserva ancora del potenziale, in termini di materia o energia, ed è pertanto una risorsa. Questo è possibile anche grazie ai moderni impianti che permettono di ricavare risorse preziose da materiali considerati tradizionalmente scarto non più utile.

2.2 Le matrici selezionate

Come visto nel capitolo precedente, sono molteplici le frazioni merceologiche oggi sottoposte a trattamento da cui si ricava nuova materia prima. Tra tutte le principali tipologie elencate, si è scelto di selezionare ai fini della presente trattazione i materiali plastici polimerici.

Tra questi è stato nuovamente necessario fare delle ulteriori considerazioni. La varietà di materie plastiche esistenti rende di fatto impossibile comprendere nello studio qualsiasi tipologia senza tralasciarne alcuna e soprattutto senza congestionare la trattazione. Per questo motivo, sulla base dei dati di produzione, utilizzo e diffusione si è ritenuto opportuno selezionare le seguenti tipologie di plastica:

- 1- polietilene (PE)
- 2- polipropilene (PP)
- 3- polistirene (PS)
- 4- polivinilcloruro (PVC)
- 5- polietilentereftalato (PET)
- 6- poliuretani (PU-)
- 7- poliammidi (PA-)

Ai fini dello studio da intraprendere si è ritenuto opportuno infine fare un'ultima selezione, mettendo da parte PET, PU e PA perché matrici caratterizzate da una combustione molto complessa e di difficile analisi. Per talune addirittura non si dispone di dati a sufficienza per il completamento dello studio e non è stato possibile integrare le prove con dei test sperimentali.

Perciò, come si avrà modo di vedere nel capitolo 4, i materiali impiegati per lo svolgimento delle simulazioni sono: polietilene (PE), polipropilene (PP), polistirene (PS) e polivinilcloruro (PVC).

2.3 Recupero e riciclaggio dei rifiuti plastici

Per favorirne il riciclaggio, la plastica viene differenziata rispetto alle altre tipologie di rifiuti già in ambito domestico.

Nel 2018, Corepla⁶ ha gestito più di 1.2 milioni di tonnellate, registrando un aumento del 13.6% rispetto alle quantità trattate nel 2017.⁽¹⁵⁾ Nel complesso dei rifiuti trattati il 91% è costituito da imballaggi di plastica e solo il 9% da frazioni estranee presenti nella raccolta mono-materiale.

Sempre nel 2018, la quantità di materiale derivante dalla raccolta differenziata ed effettivamente inviato a riciclo ammonta a poco più di 600 mila tonnellate. Anche qui si registra un aumento rispetto alle quantità conteggiate nel 2017, con un incremento percentuale pari a 9.6 punti.⁽¹⁵⁾

Imballaggi e materiali in plastica post-consumo vengono raccolti dal domicilio e conferiti presso i centri di selezione e smistamento dove avviene un'ulteriore differenziazione, basata sulla tipologia di materiale plastico polimerico. Più una frazione è omogenea, migliore sarà il processo di recupero del materiale.

Si riporta di seguito quale sia stata la ripartizione delle tipologie di materiali plastici da imballaggio, avviati a riciclo nel 2018.⁽¹⁵⁾

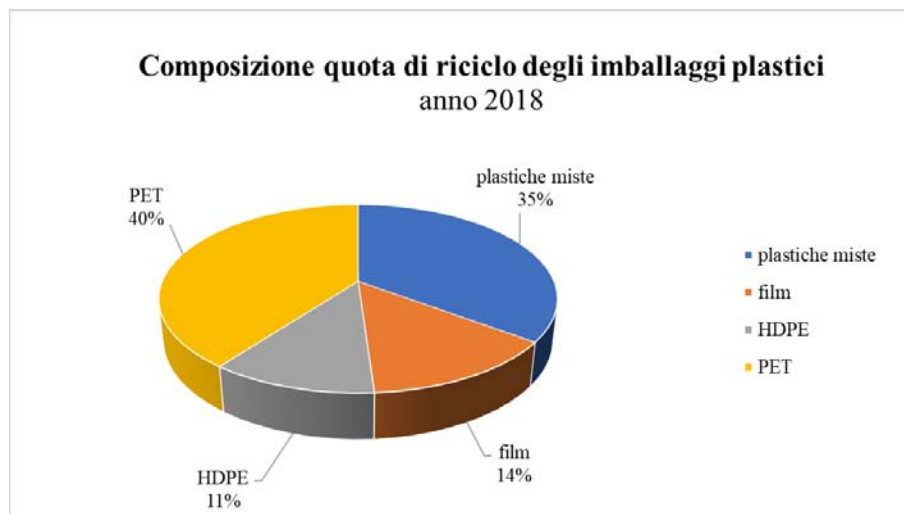


Figura 2.2: composizione delle quote percentuali di materiale plastico da imballaggio riciclato nel 2018 da Corepla⁽¹⁵⁾

Si fa notare come le frazioni preponderanti siano rappresentate dal PET e dalle plastiche miste. Il dato è significativo perché per queste ultime, come si vedrà più avanti, la pratica di riciclo presenta ancora delle criticità.

⁶ Corepla - Consorzio Nazionale per la raccolta, il riciclo e il recupero degli imballaggi in plastica. Il consorzio ha l'obbligo di ritirare (e pagare) la raccolta differenziata ai Comuni. Effettua le operazioni di selezione e pretrattamento della plastica, confeziona le balle di mono-materiale e le rivende tramite aste telematiche ai compratori che riciclano il materiale plastico.

Le tecnologie principali utilizzate per il trattamento post-consumo della plastica sono il riciclaggio (chimico o meccanico) e il recupero energetico.

Il riciclaggio chimico è un processo noto anche come depolimerizzazione; agisce direttamente sulla struttura della molecola e, scindendo i legami, riconduce la catena polimerica complessa ad una serie di monomeri singoli.

Il riciclaggio meccanico invece non va ad agire sulla struttura ma solo sullo stato di aggregazione delle macromolecole. Tramite una serie di procedimenti, che si vedranno nel dettaglio più avanti, i polimeri termoindurenti vengono ridotti in scaglie o grani (Fig. 2.3), mentre il materiale termoplastico viene ridotto in granuli.

Nel primo caso, le scaglie discendenti da materiali termoindurenti verranno utilizzate successivamente come carico inerte nella produzione di materiali termoplastici vergini. Nel secondo caso invece, i granuli di materiale termoplastico sono vera e propria materia prima secondaria pronta per essere impiegata nella produzione di altri manufatti.



Figura 2.3: esempio di materiale plastico ridotto in scaglie (foto: Plastilab Green Innovation)



Figura 2.4: esempio di materiale plastico polimerico ridotto in granuli (foto:IPPR - Istituto per la Promozione delle Plastiche da Riciclo)

In entrambi i casi, i risultati migliori si ottengono quando la frazione in ingresso ai processi di riciclo ha una bassissima percentuale di impurezze e un ottimo livello di omogeneità.

Il recupero energetico invece dà una seconda vita non al materiale in sé, ma al contenuto energetico che questo ancora conserva. Tramite l'incenerimento ad elevate temperature si ottiene energia termica ed elettrica.

2.3.1 Le operazioni di selezione

Come accennato sopra, la selezione della plastica è una fase fondamentale che precede le operazioni di riciclaggio. Più la frazione ottenuta è omogenea e migliore sarà l'efficienza del riciclo. In un impianto di conferimento e selezione, la plastica viene suddivisa come segue: frazioni omogenee di PET (polietilene tereftalato), frazioni di HDPE (polietilene ad alta densità) e frazioni eterogenee di poliolefine, *mix poliolefine*, ossia una miscela di PE (polietilene), PP (polipropilene) e PS (polistirene). I materiali accuratamente selezionati vengono poi pressati in enormi cubi, comunemente noti come *balle* o *ecoballe*, e così conservati per essere poi destinati a impianti di trattamento e riciclo. Data l'ampia varietà di tipologie diverse di materiali plastici e la necessità di ottenere un'ottima differenziazione, sono richiesti processi di selezione sofisticati. Le operazioni di smistamento possono avvenire manualmente, ad opera di addetti altamente formati, o automaticamente con l'impiego di macchinari all'avanguardia.

La selezione manuale

La selezione manuale viene svolta da operatori posizionati lungo un nastro trasportatore, alimentato - tramite una tramoggia di carico - con il materiale plastico. L'operazione serve per eliminare eventuali materiali conferiti erroneamente con la plastica, come ad esempio materiali ferrosi, vetro, carta o simili. Durante questa fase si procede all'apertura dei sacchi e all'eliminazione dei films di grandi dimensioni (sacchetti, shoppers, nylon) i quali vengono spostati su un'altra linea, accumulati e pressati in una balla.



Figure 2.5 e 2.6: Addetti alla selezione manuale al lavoro. (Foto di: Unicoop Firenze a sinistra, Corepla a destra.)

Il materiale, dopo aver subito questa prima selezione, è inviato ad un vaglio balistico che opera un'ulteriore differenziazione sulla base delle caratteristiche principali del corpo come peso, volume e forma (pezzatura piccola o corpi piatti). Si ottengono principalmente tre frazioni: sottovaglio, films residui e materiale plastico. Il sottovaglio è costituito da materiale misto di piccole dimensioni e generalmente non può essere recuperato; costituisce quindi un flusso di scarto del processo. I films, come già detto, vengono imballati in una frazione a sé stante. Il materiale plastico viene invece inviato ad un'altra fase di selezione manuale, dove molti operatori contemporaneamente separano le varie famiglie di plastica, per tipologia come già visto sopra, ma anche a seconda del colore nel caso del PET. In questo modo, alla fine del

processo si ottengono frazioni omogenee di PET incolore (trasparente), PET azzurrato, PET colorato, PE e altre plastiche. Prima di essere pressato in balle, il materiale viene controllato sotto un magnete per separarlo dall'eventuale residuo di materiali ferrosi (Fig. 2.7) e viene fatto passare in un nastro a correnti indotte, corredato di tramoggia by-pass, per eliminare materiali in alluminio eventualmente ancora presenti (Fig. 2.8).



Figura 2.7: Processo di separazione dei materiali ferrosi (Foto: ditta Malaman -Tecnologie per la separazione magnetica)



Figura 2.8: processo di separazione dei materiali non ferrosi, come ad esempio materiali in alluminio, a mezzo di nastro a correnti indotte (foto: ditta Malaman -Tecnologie per la separazione magnetica)

Si riporta di seguito una sintesi schematica del processo appena descritto (Fig. 2.9)

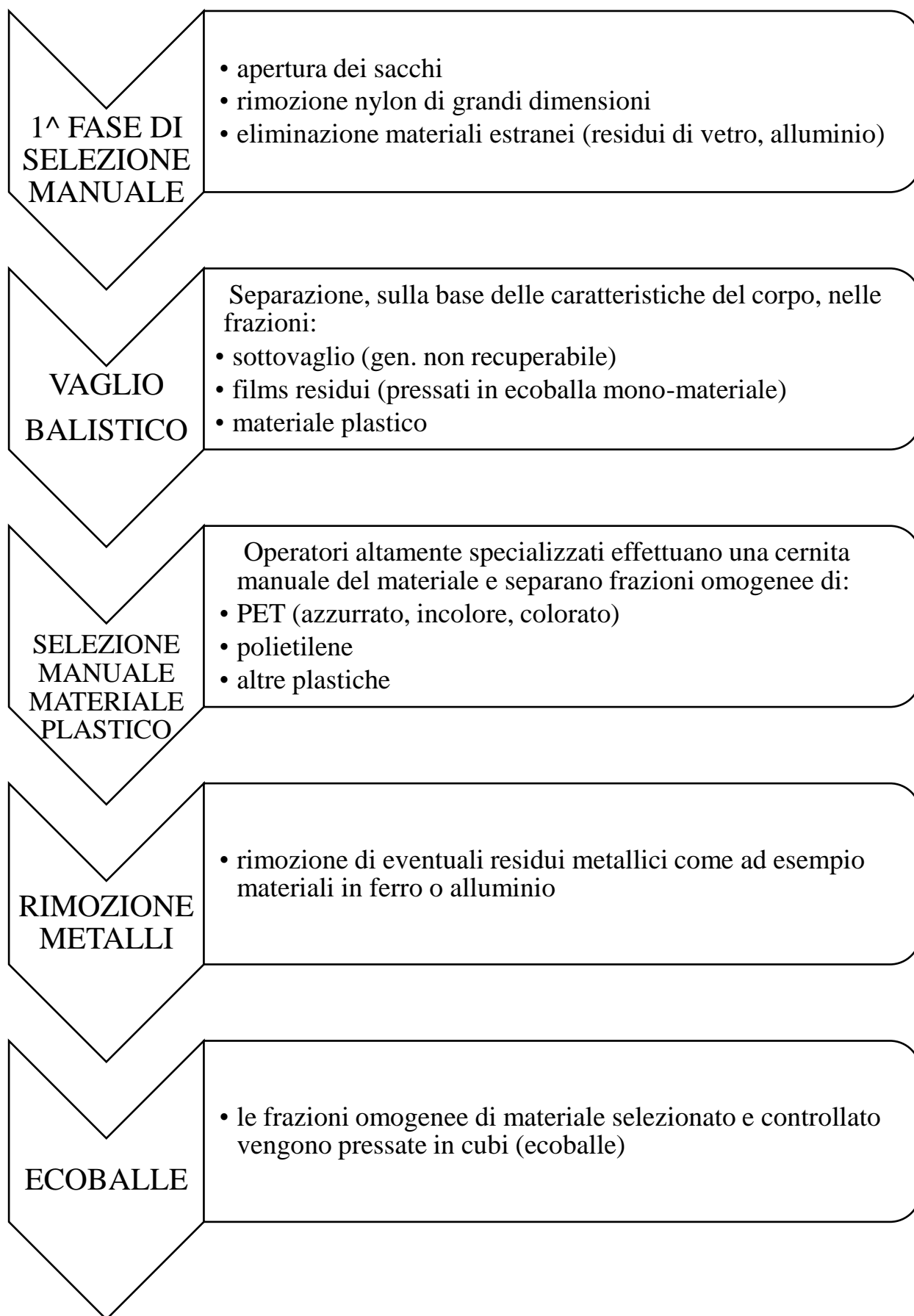


Figura 2.9: schema operazioni di selezione manuale

Selezione automatica

In un impianto di selezione automatica tutte le varie fasi di separazione sono completamente automatizzate. Una volta avvenuto il conferimento, il materiale plastico misto viene caricato nell'impianto di selezione con l'ausilio di un ragno o un muletto. La prima fase vede l'impiego di una macchina lacera sacchi che apre i sacchetti contenenti i materiali plastici. Segue un vaglio rotante che opera una prima selezione grossolana in tre differenti frazioni, a seconda della pezzatura. Il vaglio rotante consiste in un enorme tubolare allungato, le cui pareti presentano delle aperture di misure diverse.



Figura 2.10: Vaglio rotante per la separazione grossolana della plastica. (Foto: Hoffman Group)

Nel primo segmento le aperture sono piccole e lasciano passare solo i materiali di pezzatura piccola; nel secondo e terzo segmento i fori sono di dimensioni maggiori di modo da far cadere per gravità i pezzi più grandi. Il vaglio è posto leggermente inclinato e ruota attorno al proprio asse principale; il continuo rimescolamento del materiale fa sì che ogni pezzo raggiunga l'apertura conforme alle proprie dimensioni. In corrispondenza di ogni segmento, è posto sotto al vaglio un cassone o un nastro trasportatore che convoglia altrove la frazione appena selezionata. Nello specifico il materiale di dimensione inferiore a 8-10 cm viene inviato ad un ulteriore vaglio rotante che opera una selezione più accurata e separa la frazione fine da quella finissima. La prima può essere reintegrata nella linea di trattamento delle poliolefine, mentre la seconda viene utilizzata come CDR (combustibile da rifiuto) e utilizzata per il recupero energetico. Il segmento con le dimensioni maggiori raccoglie invece materiali come film, nylon, imballaggi, borse in plastica; l'impianto li separa e li conduce ad una linea apposita dove vengono trattate anche le miscele di poliolefine. Infine, il segmento intermedio, ha delle aperture tali da lasciar passare tutte le plastiche aventi le dimensioni di una bottiglia. Perciò la frazione ricavata da quella specifica sezione comprende contenitori per liquidi (alimentari e non) di diverse tipologie di materiali. Oltre ad essere il gruppo che raccoglie la maggior quantità di rifiuti, è anche quello che prevede il numero più alto di operazioni di trattamento ai fini del riciclo. I pezzi di dimensioni intermedie così ottenuti attraversano un vibrovaglio che distribuisce il materiale su un nastro trasportatore. Questa operazione risulta importante perché il materiale, opportunamente separato, passa sotto un lettore ottico a raggi infrarossi che opera

una selezione in base alla tipologia di polimero plastico. Eventuali sovrapposizioni potrebbero falsare la lettura. Il separatore in questione basa il suo funzionamento sull'impiego di sensori ad infrarosso NIR che emettono un fascio di raggi infrarossi e identificano il tipo di polimero colpito elaborando il segnale emesso nella banda dell'infrarosso.



Figure 2.11 e 2.12: Separatore a raggi infrarossi. A destra, macchinario in funzione (Foto: Steinert). A sinistra, ricostruzione grafica. Questa informazione attiva immediatamente un getto d'aria che investe il prodotto analizzato e

lo lancia fuori dal nastro. La macchina è tarata affinché il getto d'aria assuma una intensità tale da indirizzare il prodotto identificato nella linea di trattamento apposta a seconda del polimero da cui è costituito. L'immagine seguente riporta un esempio esplicativo di quanto appena detto.

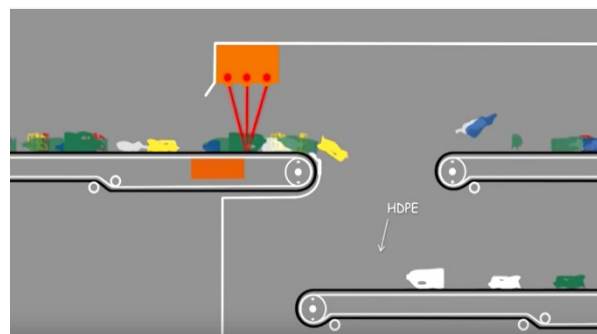


Figura 2.13: Foto da animazione esplicativa sul riciclo della plastica (Corepla)

Il materiale in arrivo sul nastro trasportatore passa al lettore ottico: se identificato come polietilene ad alta densità viene lasciato cadere sul nastro trasportatore, altrimenti viene lanciato dal getto d'aria sul proseguimento del nastro. L'operazione può essere ripetuta anche più volte in cascata in modo da ottenere frazioni via via omogenee. Quale sia l'ordine di sottrazione dei materiali dipende a seconda delle linee di processo di ogni impianto. In ogni caso la separazione che si ottiene è sempre la stessa: PET colorato, azzurrato o trasparente, HDPE (polietilene ad alta densità) e miscele di poliolefine. Il materiale in uscita subisce comunque un controllo manuale, eseguito per mano di operatori altamente specializzati per la rimozione di eventuali impurità; il separatore a raggi infrarossi ha infatti una precisione media del 95%.⁽¹⁵⁾

La frazioni così ottenute sono pronte per essere pressate e compattate in balle, comode da stoccare fino al primo utilizzo che può avvenire in loco o presso un altro impianto.

Si riporata di seguito una sintesi schematica del processo appena descritto.

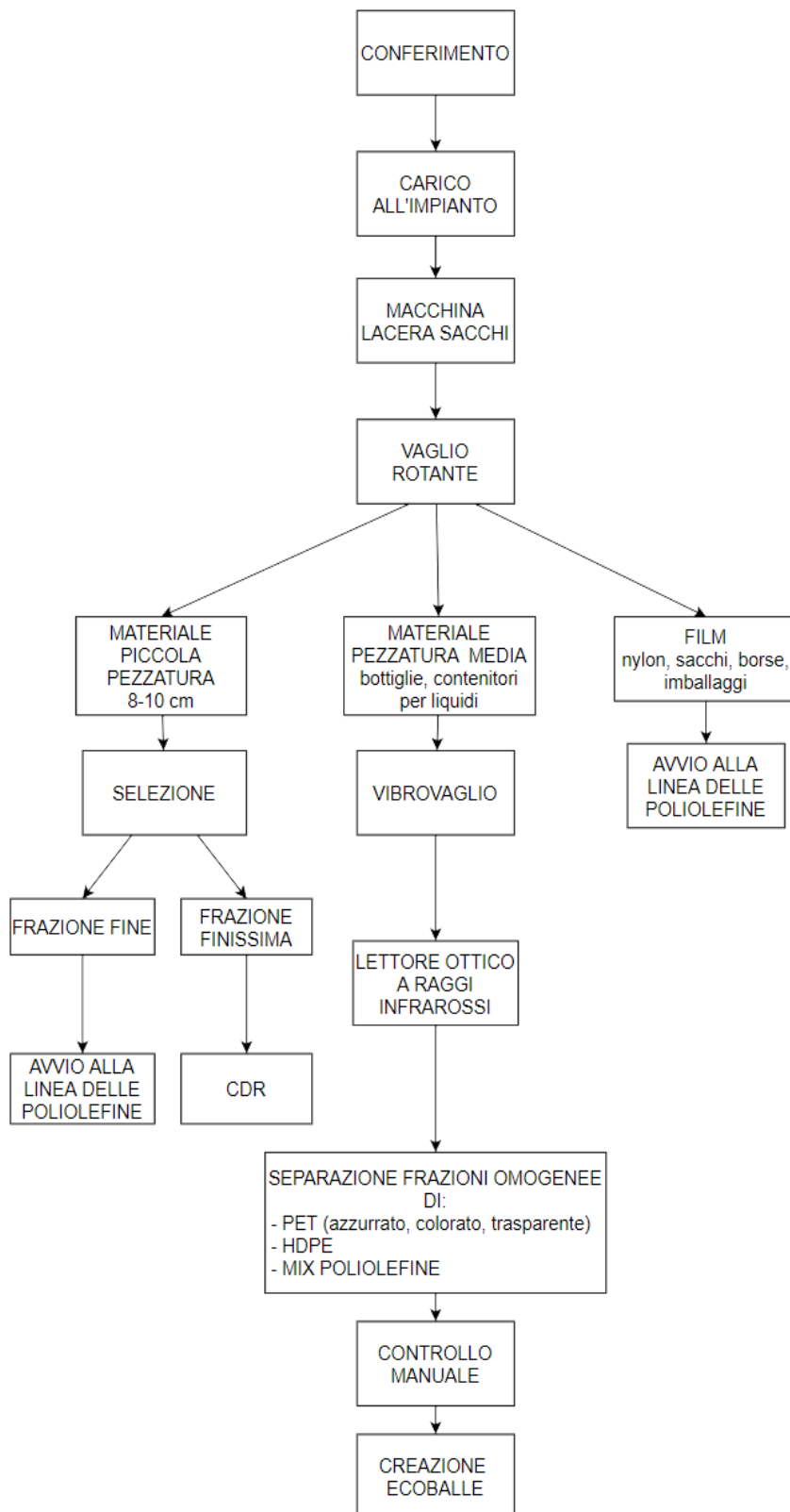


Figura 2.14: schema operazioni di selezione automatica

2.3.2 Fasi di recupero a seconda del materiale

Indipendentemente dal fatto che le frazioni omogenee siano in arrivo da impianti di selezione manuale o automatici, seguiranno lo stesso destino, determinato invece dalla tipologia di polimeri di cui sono composte.

2.5.1 Bottiglie in PET

Dopo il disimballo, tutto il materiale viene sottoposto a lavaggio per provvedere all'eliminazione di sporco e alla rimozione di colla ed etichette. Seguono ulteriori controlli per assicurarsi che non siano presenti corpi estranei, materiali metallici o residui di PVC e che la frazione di PET sia sufficientemente pura. Prima di passare alle fasi seguenti, il materiale selezionato subisce un'ultima cernita manuale da parte di operatori specializzati. Successivamente, le bottiglie entrano in un mulino tritatore che le frammenta in una pezzatura di circa 2 cm. Le scaglie ottenute vengono nuovamente sottoposte ad operazioni di lavaggio con acqua e additivi. Qui le scaglie derivanti dalla frantumazione dei tappi, essendo prodotte in HDPE, sono in grado di risalire in superficie e di galleggiare nella vasca da dove vengono quindi prelevate e avviate lungo un'altra linea. Dopo la separazione per flottazione, le scaglie di PET rimaste sul fondo vengono inserite in una centrifuga dove per frizione reciproca subiscono un'ulteriore pulizia (processo anche noto come *friction washer*). Seguono il risciacquo e l'asciugatura delle scaglie. Le scaglie così ottenute vengono sottoposte ad una seconda triturazione, che le porta questa volta ad una dimensione di circa 8 mm in ambiente umido. A questo punto le scaglie prendono il nome di *flakes di PET* e dopo un processo di asciugatura e depolverizzazione vengono stoccate in enormi silos, dove sono continuamente movimentate. Se i controlli qualità condotti nell'azienda danno risultati soddisfacenti, il PET è pronto per essere insaccato nei *big bags* (enormi sacchi bianchi) o per essere inviato all'estrusore per la produzione di granuli.

Il PET riciclato che non ha subito complicazioni nella fase di produzione può essere stampato (generalmente si parla di stampa a iniezione) per la produzione di oggetti di design. Viene utilizzato anche per la produzione di articoli d'arredamento per la casa o il giardino. La maggior parte del PET riciclato viene ridotto in fibre e utilizzato in fiocchi di alta qualità, o filato, altrimenti trasformato in non-tessuto oppure ridotto a materiale di riempimento. Dal PET è possibile ottenere un filo di poliestere di alta qualità e tessuti per l'arredamento con buone caratteristiche ignifughe ed antifumo. Molto utilizzato anche nel settore dell'abbigliamento. I granuli derivanti da riciclo possono essere lavorati fino alla trasformazione in una particolare tipologia di tessuto di produzione industriale, non ottenuto con i consueti processi di tessitura e per questo noto come *non-tessuto*. Il PET così trasformato può essere impiegato per la produzione di filtri, materiale assorbente, teli da campeggio e simili.

2.5.2 HDPE

Nel riciclo del polietilene ad alta densità, il materiale disimballato viene subito avviato a triturazione. Il materiale frantumato in piccoli pezzi viene quindi condotto, su un nastro trasportatore, alle vasche di lavaggio e flottazione. Impurità ed eventuali materiali estranei vengono separati per gravità, mentre il polietilene ad alta densità galleggia in superficie. Il materiale, una volta asciutto, viene avviato direttamente all'estrusore. Qui l'HDPE viene riscaldato fino al punto di fusione e spinto attraverso una piastra forata. I tubolari che si producono per estrusione sono prontamente tagliati da una lama e ridotti in granuli. Segue quindi un controllo qualità. Se tutti i requisiti sono soddisfatti, i granuli di HDPE vengono insaccati nei *big bags* e stoccati in sicurezza.

L'HDPE riciclato viene utilizzato come contenitore per liquidi e oli purché destinati ad un uso non alimentare, mentre è consentito l'impiego per liquidi di uso domestico come detersivi e detersivi. Un'alternativa che sta prendendo piede consiste nell'utilizzare un film di HDPE riciclato tra più strati di materiale vergine per aumentare spessore e resistenza, favorendo una riduzione dell'impiego di materia prima non riciclata ma riuscendo a garantire ugualmente standard elevati di sicurezza, idonei anche all'uso alimentare. L'HDPE steso in fogli sottili viene utilizzato per la produzione di buste della spesa, sacchi per l'immondizia e simili. Non mancano gli usi in ambito urbano, dove l'impiego ha il secondo scopo di minimizzare l'utilizzo di materiali come legno e cemento. Più ridotte le applicazioni nell'ambito dell'edilizia a causa della scarsa resistenza strutturale e l'elevata deformabilità, caratteristiche che lo rendono poco adatto a sostenere carichi. Inoltre, l'HDPE viene usato anche per la produzione di contenitori rigidi, o per la produzione di cassette impiegate nel settore ortofrutticolo.

2.5.3 Miscela di poliolefine

Il processo di trattamento delle poliolefine è molto simile a quello seguito per l'HDPE ma viene condotto su due linee diverse solo per evitare possibili contaminazioni. Niente di diverso da segnalare rispetto a quanto già descritto per triturazione, lavaggio e flottazione. La differenza si incontra dopo la fase di essiccazione. Il prodotto asciutto non può essere avviato direttamente all'estrusore ma subisce una fase di densificazione, per permettere al materiale di rapprendersi e raggiungere una densità tale da essere lavorato. Anche qui, i granuli di mix poliolefine sono insaccati in *big bags* e stoccati in condizioni controllate.

Nel mix poliolefine rientrano polietilene e polipropilene ma anche i materiali di scarto di tutto l'impianto di selezione.

In realtà, una frazione della matrice eterogenea così ottenuta non è riciclabile. È nota come *plasmix*⁷ e solo gli impianti di selezione più evoluta riescono a separarla dalla miscela di poliolefine che, contrariamente, possono ancora essere utilizzate per ricavare materia prima secondaria. Così facendo si rende possibile il recupero di materiali che sarebbero altrimenti destinati all'incenerimento o al conferimento in discarica.

Il materiale ottenuto dal riciclo delle poliolefine presenta eccellenti proprietà meccaniche e buone proprietà estetiche, può essere utilizzato per produrre oggetti semplici, aventi sezioni non troppo sottili. Per questo motivo trova impiego nell'ambito urbano come materiale per la produzione di fioriere, panchine o pavimentazioni per esterni. Un'ulteriore possibilità riguarda l'impiego per la fabbricazione di componenti nel settore automobilistico, come ad esempio cruscotti e pedane. Tuttavia, come si vedrà più avanti nella sezione delle criticità, le materie plastiche derivate da frazioni eterogenee hanno un mercato estremamente ridotto anche a causa dei prezzi competitivi dati da altri materiali vergine aventi caratteristiche di efficienza pari, se non addirittura superiore. Inoltre, non trova al momento una posizione nel mercato che sia di valore o che sia indispensabile per determinate caratteristiche, rendendolo di fatto poco appetibile.

2.6 Stabilimenti di rifiuti: matrici combustibili tipiche

Alla luce dei processi e delle modalità di gestione dei rifiuti, in uno stabilimento di rifiuti si può configurare la presenza di matrici combustibili diversificate. Le frazioni di origine plastica rappresentano un materiale combustibile interessante nell'ottica di indagare scenari di incendio che potrebbero verificarsi in queste attività.

Le materie plastiche sono sostanze chimiche dette anche plastomeri, ossia sono costituite da materiale polimerico dotato di elevata plasticità. Partendo dalla lavorazione del petrolio si praticano delle operazioni di rottura delle molecole (op. di *cracking*) che permettono di ottenere i principali monomeri base, alcuni dei quali sono noti come: etilene, propilene, butadiene e stirene.⁽¹⁶⁾ Questi monomeri vengono poi ri-assemblati assieme, tramite processi di polimerizzazione o policondensazione, per ottenere dei composti a catena lunga dotati di diverse caratteristiche e proprietà. Le catene polimeriche possono essere ottenute anche additivando particolari catalizzatori; inoltre, possono presentare caratteristiche lineari o ramificate ed essere indipendenti o unite fra loro a formare una struttura tridimensionale.

Nel caso di catene lineari (o poco lineari) indipendenti si parla di polimeri termoplastici. I polimeri di questo tipo iniziano a liquefare se portati alla temperatura di fusione mentre

⁷ “L’art. 1 della proposta di legge Atto Camera n. 4502 presentata il 18 maggio 2017 definisce il *plasmix* come un “insieme di plastiche eterogenee incluse negli imballaggi post-consumo e non recuperate come singoli polimeri” che possono essere usate per produrre granuli da riciclo a base poliolefinica.”⁽¹⁷⁾

solidificano non appena la temperatura torna al di sotto del punto di fusione. Sono facili da lavorare perché una volta riscaldati diventano malleabili, salvo poi solidificarsi nella fase di raffreddamento mantenendo le sembianze acquisite. Nel caso invece di catene ramificate a formare un reticolo tridimensionale si parla di polimeri termoindurenti. Diversamente dal caso precedente, se sottoposti a temperature elevate non fondono ma iniziano a degradarsi decomponendo la loro struttura.

Le tipologie di plastica più comuni in uno stabilimento di gestione di rifiuti sono riportate nella Tabella 2.1.

Tab. 2. Errore. Per applicare 0 al testo da visualizzare in questo punto, utilizzare la scheda Home..1: tipologie di plastica trattate frequentemente in uno stabilimento di deposito e gestione dei rifiuti. Relative proprietà di reazione al fuoco e emissione di sostanze durante la combustione [rif. (18.a), (19), (20)]

Materiale	Proprietà
polietilene, PE (CH ₂) _n	<ul style="list-style-type: none"> • comportamento termoplastico • A seconda della struttura si suddivide in: <ul style="list-style-type: none"> ○ HDPE (polietilene ad alta densità): formato da catene lineari, buone caratteristiche di rigidità e resistenza ○ LLDPE (polietilene lineare a bassa densità) ○ LDPE (polietilene a bassa densità): struttura ramificata, buone caratteristiche di leggerezza, flessibilità, duttilità <p>Comportamento al fuoco: materiale combustibile, presenta temperatura di infiammabilità pari a 341°C; a seconda delle caratteristiche del polimero raggiunge la temperatura di autocombustione tra i 350° e i 445°C circa.</p> <p>Emissioni da combustione: formazione di idrocarburi ciclici e aromatici per degradazioni termiche ad alta temperatura. Durante la combustione può generare CO, CO₂ e particolato.</p>
polipropilene, PP (CH ₃) _n	<ul style="list-style-type: none"> • comportamento termoplastico <p>Comportamento al fuoco: materiale combustibile, temperatura di infiammabilità pari a 320 °C circa, autocombustione a circa 350°C.</p> <p>Emissioni da combustione: la decomposizione termica in atmosfera inerte genera frazioni comprese tra il 10% e il 25% di propilene. Durante la combustione può generare CO, CO₂ e particolato.</p>

<p>polistirene, PS (C₈H₈)_n</p>	<ul style="list-style-type: none"> • buone caratteristiche di trasparenza e isolamento <p>Comportamento al fuoco: materiale combustibile, punto di infiammabilità a 345-360°C, temperatura di autocombustione a 427°C.</p> <p>Emissioni da combustione: a seguito di degradazione termica produce acido benzoico, fenoli, benzaldeide e alcol benzilico. Durante la combustione può generare CO, CO₂ e particolato.</p>
<p>Polivinilcloruro, PVC (C₂H₃Cl)_n</p>	<ul style="list-style-type: none"> • comportamento termoplastico <p>Comportamento al fuoco: materiale combustibile. Nel caso di PVC rigido, il punto di fiamma si attesta intorno ai 390 °C circa. La temperatura di autoaccensione invece varia tra 385-450 °C ma, nel caso di materiali trattati, può arrivare a picchi molto più alti come nel caso del C-PVC (cloruro di polivinile clorurato) dove la temperatura di ignizione si attesta sui 640°C circa.</p> <p>Emissioni da combustione: a temperature comprese tra i 200 °C e i 300 °C, circa l'80-95% del contenuto di cloro del PVC rigido è rilasciato in aria come HCl. Alla temperatura di 300°C il 70% di HCl è rilasciato entro il primo minuto di combustione. In caso di combustione a circa 650 °C si ritrova il 75-90% di cloro sottoforma di acido cloridrico.</p>
<p>Polietilentereftalato, PET (C₁₀H₈O₄)_n</p>	<ul style="list-style-type: none"> • comportamento termoplastico • caratteristiche di trasparenza, resistenza e impermeabilità ai gas <p>Comportamento al fuoco: materiale combustibile, raggiunge il punto di autoaccensione a 407 °C.</p> <p>Emissioni da combustione: con prove sperimentali si è riscontrato che durante la pirolisi del PET si sviluppano quantità di: acido benzoico (43%), acetaldeide (16%), anidride carbonica (10%) ed una percentuale minore di esteri dell'acido benzoico.</p>
<p>Poliuretani, PU</p>	<ul style="list-style-type: none"> • polimero termoindurente <p>Comportamento al fuoco: la temperatura di autoaccensione delle schiume poliuretatiche si aggira attorno ai 400-410 °C. Il poliuretano espanso rigido è dotato di buone prestazioni di resistenza alle alte temperature; ha punto di infiammabilità a 310 °C circa.</p>

Emissioni da combustione: in condizioni di abbondante ventilazione, i poliuretani producono quantità tossicologicamente rilevanti di acido cianidrico

Poliammidi, PA

- caratteristiche di alta resistenza e rigidità

le tipologie principali sono: PA6, PA6.6, PA11

Comportamento al fuoco: presentano una buona resistenza intrinseca all'ignizione. Il PA6 ad esempio ha punto di infiammabilità a 420 °C e temperatura di autoaccensione pari a circa 450 °C.

Emissioni da combustione: la decomposizione a 600°C in atmosfera inerte produce ciclopentano (39%), anidride carbonica (26%), umidità (6%) e caprolattame (6%).

2.7 Le criticità nel riciclo della plastica

Per quanto sia una buona pratica, il riciclo della plastica conserva ancora in sé alcuni aspetti critici che ne pregiudicano fortemente l'utilizzo. Le ragioni sono principalmente tecniche e strettamente correlate a problematiche di processo, ma non mancano nemmeno dubbiosità sotto il profilo economico. Di seguito si elencano nel dettaglio le criticità tipiche di ogni frazione selezionata e destinata al riciclo.

§ - PET

I primi aspetti critici da prendere in considerazione sono quelli legati a dinamiche di processo. La rilavorazione del PET e la degradazione termica della catena polimerica comportano una riduzione del peso molecolare che si manifesta anche tramite la riduzione della viscosità intrinseca. Valori bassi di viscosità rendono difficoltosa l'estrusione e la laminazione del PET riciclato. Inoltre, il PET in arrivo dalle fasi di selezione deve essere accuratamente essiccato perché percentuali anche molto basse di umidità inficiano pesantemente il processo di riciclaggio causando degradazione durante le fasi di rilavorazione.

Alcune criticità si attestano anche relativamente alla qualità del prodotto. Come già detto molteplici volte, concentrazioni minime di impurità pregiudicano fortemente la qualità del prodotto finito. Ciò fissa standard molto alti nella fase preparatoria di selezione del materiale, rendendo di fatto il lavoro molto complesso e facilmente vanificabile. Le matrici devono essere praticamente omogenee e i materiali perfettamente puliti, eppure ciò non basta. Se qualche prodotto, avviato a riciclo, ha subito degradazioni termiche od ossidative causerà la compromissione delle proprietà meccaniche ed estetiche nel materiale finale. Come conseguenza potranno verificarsi fenomeni di fragilità nel primo caso o ingiallimento del PET trasparente nel secondo.

Infine, non va nemmeno trascurato l'aspetto economico. Alla luce dei requisiti altamente stringenti, risulta facile comprendere che la selezione e la preparazione del materiale abbia un costo molto alto. Ma ciò che grava di più su questo aspetto è la concorrenza sul mercato, dovuta alla presenza di resine molto meno costose, in grado di assolvere alle stesse funzioni per le quali viene impiegato il PET riciclato. Ne consegue che un costo alto, investito nel riciclo del PET, non sempre è ripagato da una sufficiente domanda di mercato.

§ -HDPE

Una delle principali criticità riguardo il riciclo dell'HDPE ha a che fare con la possibilità di utilizzo del materiale così ottenuto. Infatti, i granuli di HDPE riciclato non possono essere utilizzati per la produzione di contenitori per cibo o bevande, in quanto non risulta idoneo a soddisfare i requisiti per l'uso alimentare. Inoltre, non può essere utilizzato così com'è per la fabbricazione di bottiglie per detersivi in quanto è un omopolimero e necessita di modifiche eseguite spesso con l'aggiunta di additivi o copolimeri⁽¹⁶⁾. Un altro aspetto di criticità ha a che fare con i processi di lavorazione. L'HDPE riciclato presenta un basso punto di fusione e perciò non può essere usato per la fusione a iniezione. D'altro canto, le caratteristiche di densità e rigidità non lo rendono idoneo alla produzione di films, che risulterebbero di scarsa qualità e tendenti alla rottura. È invece idoneo all'utilizzo nei processi di soffiaggio.

§ - Miscela di poliolefine

Il mix poliolefine raccoglie una miscela di plastiche eterogenee aventi caratteristiche chimico-fisiche differenti. In primo luogo, la maggior criticità è rappresentata dalle diverse temperature di fusione dei materiali che rende difficile trovare le condizioni ottimali per la lavorazione. Per queste ragioni la miscela di poliolefine non può essere utilizzata per la fabbricazione di prodotti fini, aventi spessori esigui, né per la costruzione di prodotti di forma complessa che richiederebbero un lungo processo di lavorazione. Infine, secondo lo *Studio di fattibilità nell'ambito dell'Economia Circolare mirato al riciclo delle plastiche miste*, il mix di poliolefine:

[...] rispetto alle plastiche "nobili" (PET, HDPE) che hanno da tempo una loro filiera di recupero materia, [le poliolefine eterogenee], tecnicamente riciclabili e riciclate da alcune imprese italiane, sono destinate all'incenerimento o allo smaltimento in discarica, nonostante costituiscano la metà delle plastiche raccolte in maniera differenziata dai Comuni. Lo smaltimento del plasmix, tramite l'utilizzo dell'inceneritore, comporta, altresì, un elevato costo di smaltimento per il consorzio Conai (Consorzio Nazionale Imballaggi) e per i Comuni.

Inoltre, si legge anche che in Italia sono solo tre gli unici impianti di riciclo che trattano anche materie plastiche miste derivanti dalla selezione dei rifiuti plastici post-consumo, producendo da questi granuli di mix poliolefine.

Capitolo 3

La fluidodinamica degli incendi e FDS

Nel presente capitolo si propone una breve incursione nel mondo della fluidodinamica degli incendi. Infatti, per avere un approccio più consapevole allo studio, si ritiene necessario capire quali siano le dinamiche fisico-chimiche che regolano la combustione ma, ancor prima, quali siano i fattori che possono scatenarla. Infine viene proposta un'introduzione in merito ai principali strumenti di indagine e progettazione moderni, impiegati per la conduzione delle simulazioni.

3.1 Dinamica dell'incendio: modalità di innesco e propagazione degli incendi nei depositi di rifiuti misti

3.1.1 Innesco

Per innesco si intende qualsiasi oggetto o vettore di energia che sia in grado di fornire a dei materiali combustibili una quantità di energia termica tale da dare avvio alla reazione di combustione. Nel tentativo di contrastare l'insorgenza di incendi nei depositi di rifiuti, il primo passo da fare è ricercare quali siano le possibili cause di innesco e approfondire in quali contesti sia maggiore la probabilità del verificarsi di un tale evento.

Le sorgenti principali di innesco agiscono tradizionalmente per:

- accensione diretta
- accensione indiretta

Si parla di *accensione diretta* quando una fiamma o una scintilla entrano in contatto con un materiale combustibile, in presenza di ossigeno (o altro comburente). In un deposito di rifiuti può avvenire accidentalmente durante lavori di saldatura o taglio a caldo, eseguiti nelle vicinanze di materiale stoccato. Anche un mozzicone di sigaretta gettato acceso su materiali altamente infiammabili può costituire una fonte di innesco sufficiente ad avviare un incendio. Meno frequenti ma non per questo trascurabili, episodi di fulmini che vanno a scaricarsi sulle pensiline di copertura dei depositi o su materiale metallico eventualmente posizionato sulla sommità del cumulo di rifiuti stoccati all'aperto.

Si parla di *accensione indiretta* quando l'innesco è costituito da una sorgente che non entra in contatto diretto con il materiale combustibile ma che 'attiva' l'incendio a distanza attraverso la trasmissione del calore per irraggiamento, conduzione o convezione. Nei depositi all'aperto, l'unica reale minaccia è rappresentata dall'irraggiamento. Può verificarsi ad esempio come conseguenza di un incendio originatosi distintamente ma che emette una quantità di energia termica tale da innescare a distanza le superfici esposte del cumulo di rifiuti stoccato all'aperto.

Un altro aspetto che va altresì tenuto sotto controllo è l'attrito. Nei depositi di grandi dimensioni è molto probabile che si utilizzino macchine per la movimentazione o nastri trasportatori. Se non adeguatamente mantenute, le parti in moto di queste macchine possono presentare fenomeni di attrito dovuto allo sfregamento ripetuto e conseguentemente surriscaldamento delle parti interessate o addirittura scintille. Ciò può essere una sufficiente fonte di innesco che non va dunque trascurata trattandosi di apparati in stretto contatto con il materiale movimentato.

Un ulteriore fenomeno che può provocare l'accensione di un focolare è l'ignizione spontanea, comunemente nota con il termine di autocombustione. Il processo che si instaura in questi casi è molto più complesso e avviene solo in determinate condizioni favorevoli di temperatura, pressione, ventilazione e umidità. Si verificano reazioni chimiche esotermiche spesso dovute a ossidazione spontanea o fermentazione. Se il calore prodotto in queste reazioni non è altrettanto velocemente disperso verso l'esterno, si genera un surriscaldamento interno che può portare la matrice interessata fino alla sua temperatura di autoignizione, dando così avvio alla combustione spontanea. I fattori che generalmente favoriscono questo fenomeno sono [18.b]:

- temperatura ambiente: maggiore è la temperatura esterna e maggiore è la probabilità che si verifichi autocombustione. Nei pomeriggi assolati in piena estate, le temperature dei rifiuti stoccati in un deposito all'aperto possono raggiungere valori molto elevati che portano il cumulo ad avere naturalmente condizioni tendenti al surriscaldamento. Contrariamente, nei mesi invernali, le temperature estreme instaurano un gradiente termico notevole (cioè una grande differenza tra temperatura ambiente e temperatura interna alla matrice rifiuti) che favorisce una dispersione termica più intensa evitando il surriscaldamento interno.

- isolamento termico: se il cumulo è isolato, la dispersione di calore sarà molto bassa o quasi nulla favorendo quindi l'aumento di temperatura interna e le implicazioni già viste.

- irraggiamento solare: l'irraggiamento solare a cui è esposto un cumulo stoccato all'aperto in determinati periodi dell'anno può raggiungere anche valori molto elevati, provocando un notevole surriscaldamento.

- dimensioni del cumulo: maggiori sono le dimensioni del cumulo e maggiore è la possibilità che si inneschi la combustione spontanea.

- natura del materiale stoccato: materiali di natura fibrosa o porosa presentano un'ampia superficie esposta realizzando condizioni più favorevoli per la combustione rispetto a corpi più compatti e di dimensioni simili; in maniera analoga, le stesse considerazioni valgono anche per il materiale sminuzzato in parti molto piccole come truciolo o polvere.

- tempo di stoccaggio: se il materiale è depositato per periodi brevi è facile che venga scorporato prima che possa generarsi il processo di autocombustione. Contrariamente, nel caso in cui si

instauri una combustione covante all'interno del cumulo, muovere il materiale potrebbe distribuire l'ossigeno necessario affinché la combustione si sviluppi.

A tal proposito si precisa che particolare attenzione va riservata al fenomeno degli incendi covanti. Può accadere che in zone centrali di un cumulo di rifiuti in deposito o di un'ecoballa, si verifichino condizioni favorevoli per dare avvio a reazioni di pirolisi con conseguente rilascio di gas infiammabili. In situazioni come questa per chiudere il cosiddetto 'triangolo del fuoco', triade di elementi necessaria a dar vita alla combustione, manca solo il comburente cioè l'ossigeno. Un tale scenario è altamente pericoloso perché può dar luogo a inneschi differiti nel tempo. A fronte di un'improvvisa disponibilità di ossigeno, dovuta ad esempio alla movimentazione dei materiali, la combustione si attiva immediatamente e rapidamente, incendiando la quantità di gas di pirolisi rimasti fino ad allora incombusti e il materiale combustibile ivi presente. È una combustione che si caratterizza per l'assenza di fiamma e per questo può essere difficile da identificare nel primo stadio; il fenomeno è comunque rilevabile tramite monitoraggio della temperatura e tramite sorveglianza visiva nel caso in cui avvenga rilascio di sostanze gassose. Mentre la combustione con fiamma si arresta per concentrazioni volumetriche di ossigeno che si attestano attorno all'8-12%, la combustione covante può autosostenersi anche se la concentrazione volumetrica scende al di sotto del 5%.

Si sottolinea che l'auto ignizione è un fenomeno lento, preceduto da segnali come odore, emissione di vapori e fumo di colore chiaro, che filtrano dall'interno della massa fino alla superficie. Se il deposito è adeguatamente sorvegliato l'incendio può essere tempestivamente individuato e bloccato nelle prime fasi. Qui in particolar modo è fondamentale la tempistica di intervento perché il passaggio da combustione interna a incendio generalizzato avviene repentinamente.

L'autocombustione avviene in presenza di sostanze piroforiche o, come è più facile trovare, in presenza di materiali organici di natura vegetale o animale. Nei cumuli di rifiuti misti, possono trovarsi materiali come stracci di cotone o iuta (magari imbevuti di olii lubrificanti), carta da macero umida, residui di rifinitura dei pellami, materiali intrisi di colori ad olio, vernici, olii catalizzatori; tutti elementi che potrebbero dare luogo a combustione spontanea. Trattando nel presente elaborato esclusivamente materie plastiche, il problema dell'autocombustione è relativamente trascurabile ma si rimanda comunque alla tab. 2.1, §2.6 per le temperature specifiche.

A valle di tutto ciò, è importante sottolineare che l'efficacia di un innesco non dipende dalla tipologia ma dalle sue caratteristiche e dalle proprietà del materiale interessato. Innanzitutto la potenza termica, cioè la quantità di energia che la fonte di innesco riesce a trasferire al corpo nell'unità di tempo, deve essere sufficiente a compensare e superare la dispersione termica che si verifica nel corpo stesso. L'entità della dispersione dipende prima di tutto dalle caratteristiche

di conducibilità del mezzo investito e in secondo luogo anche dalle condizioni ambientali. Inoltre, il materiale sarà più o meno “sensibile” all’innescò a seconda delle sue caratteristiche di reazione al fuoco, infiammabilità e temperatura di ignizione.

Purtroppo occorre aggiungere che, in molti casi come già anticipato, le cause di innescò sono di origine dolosa. Gli incendi sono provocati intenzionalmente apportando una o più fonti di innescò al materiale stoccato e cercando di favorire la combustione anche per mezzo di acceleranti.

3.1.2 Propagazione

Una volta che l’innescò entra in contatto con il combustibile, se le condizioni di temperatura e ventilazione lo permettono, ha inizio la combustione. Quindi segue la propagazione che si sviluppa come risultato di una serie fenomeni ciclici [18]:

1. le fiamme che interessano la superficie del solido bruciano localmente e nello stesso momento riscaldano la zona immediatamente adiacente al focolare, causando la scissione di particelle dall’area limitrofa con formazione e rilascio di vapori infiammabili e gas di pirolisi.
2. l’ossigeno presente nell’ambiente e i gas di pirolisi emessi dalla porzione di area riscaldata, si miscelano in prossimità della superficie
3. la miscela si incendia propagando così la fiamma
4. la fiamma interessa altre porzioni di superficie che riscaldate emettono vapori come al punto 1

La propagazione dipende molto dalle caratteristiche di reazione al fuoco e infiammabilità dei materiali interessati dalle fiamme. Se il grado di partecipazione all’incendio del materiale combustibile è alto, il contributo all’incendio in termini di energia rilasciata è notevole; il materiale coinvolto nella combustione, bruciando rilascia un’energia termica che va ad alimentare l’incendio stesso favorendone lo sviluppo. Inoltre, un materiale altamente infiammabile sviluppa una reazione di ossidazione molto rapida che comporta una propagazione altrettanto veloce.

La velocità di propagazione e la capacità di autosostentamento della fiamma, sono direttamente dipendenti dall’equilibrio fra il riscaldamento dato dalla fiamma e l’aumento conseguente della temperatura superficiale. Se il fronte di combustione avanzando porta le fiamme a lambire un’area maggiore di quella che sta già bruciando prima che la combustione localizzata si sia estinta, la propagazione subisce un’accelerazione.[18]

Alla luce di queste considerazioni, un altro aspetto molto influente per la dinamica della propagazione è la posizione relativa della fiamma rispetto alla superficie su cui agisce.

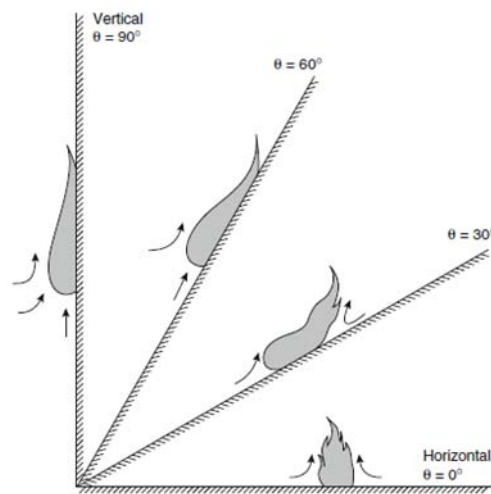


Figura 3.1: Variazione della modalità di propagazione della fiamma a seconda dell'angolo di inclinazione del piano [18]



Figura 3.2: tipico esempio di combustione di un cumulo di stoccaggio in deposito all'aperto (Foto: la Rampa.it)

La fiamma che si muove su di una superficie inclinata verso l'alto, tende a piegarsi verso la superficie stessa già intorno ai 15°-30° di inclinazione del piano [18]. Oltre alla porzione di area localizzata in corrispondenza del focolare, viene interessata anche un'ulteriore parte investita dal pennacchio di fuoco. Ciò comporta un'estensione dell'area di pirolisi e un aumento della velocità di propagazione. Per facilitare la comprensione di questo aspetto si invita al confronto tra le Fig. 3.1 [18.f] raffigurante uno schema esemplificativo tratto dal libro SFPE Handbook e un'immagine di un tipico esempio di combustione in un deposito all'aperto.

La propagazione è accelerata su di una superficie che abbia subito irraggiamento intenso e prolungato da un eventuale altro incendio antistante.

Inoltre, la propagazione, ma ancor prima l'innesco, sono ritardati nel caso in cui il combustibile contenga un alto contenuto di umidità.

Ad incidere molto sulla velocità e direzione di propagazione sono l'azione del vento e dei possibili moti di aria generati alla combustione. Si distinguono i due casi a seconda che la propagazione avvenga nella stessa direzione del flusso d'aria principale (wind-aided o concurrent spread) o nella direzione opposta a questo (opposed-flow spread). Generalmente il primo caso favorisce una propagazione rapida mentre il secondo comporta una propagazione più lenta e talvolta instabile.

Un altro aspetto fondamentale ai fini della propagazione è la disponibilità di comburente, comunemente ossigeno e quindi per estensione di aria. Nei depositi all'aperto, oggetto di studio di questa tesi, si considera che la ventilazione sia perfetta ed infinita e perciò è possibile assumere che l'incendio sia sempre controllato dal combustibile.

Naturalmente si considera il carico d'incendio, dovuto alla quantità totale di materiale stoccato e alle sue caratteristiche energetiche e di partecipazione al fuoco, ma è utile considerare anche la conformazione e lo sviluppo geometrico del corpo interessato dall'incendio. A parità di massa, la combustione è tanto più favorita quanto più la geometria del materiale presenta una maggiore superficie esposta. Se i corpi soggetti a combustione sono molto densi e aderenti tra di loro bruceranno lentamente e le fiamme potrebbero non riuscire a propagarsi. Al contrario, se il deposito di rifiuti presenta degli spazi interni, dei cavedi o dei veri e propri percorsi dove può circolare l'aria, è molto più facile sia che l'incendio abbia inizio, sia che si diffonda e interessi anche il resto della massa. Per le stesse ragioni l'innesco e la propagazione sono favoriti nel caso in cui il materiale sia stoccato in piccola pezzatura o addirittura sminuzzato in forma di trucioli e polvere.

Infine, anche la finitura superficiale ha una qualche influenza. Materiali con una superficie ruvida o rigata da scanalature, oltre ad avere una superficie esposta più estesa, durante la fase di pirolisi rilasciano una maggiore quantità di composti gassosi alimentando così ulteriormente la combustione e la velocità di propagazione. Nei depositi di materiale omogeneo, questo fattore può incidere notevolmente sulla dinamica dello sviluppo.

3.1.3 Evoluzione e velocità di crescita: confronto tra incendio di compartimento e incendio all'aperto

Come appena visto, i parametri che caratterizzano lo sviluppo dell'incendio sono molti, ognuno ha la propria influenza e concorrono nella determinazione dello sviluppo della combustione.

Una prima fondamentale distinzione sorge in relazione allo spazio dove avviene l'incendio. Se si considera una combustione in locale chiuso, si sta parlando di un incendio di compartimento e la dinamica di evoluzione è generalmente nota. In questo caso, infatti, è possibile stabilire con precisione i limiti dello spazio in esame, nonché i relativi apporti in

termini di materia ed energia. Prendendo in esame uno spazio definito e confinato e conoscendo le quantità di carico di incendio, la disponibilità di ossigeno, l'andamento dei flussi di aria e gas di combustione, è possibile prevedere l'andamento dei processi che regolano la reazione di combustione.

Diversamente, in uno spazio aperto non è possibile definire con uguale precisione le condizioni al contorno della combustione e di conseguenza è difficile prevedere l'evoluzione dell'incendio.

Generalmente, nella progettazione antincendio, per tenere conto di quale sia la tendenza ad evolversi di un incendio è prassi utilizzare delle curve che descrivono il comportamento del focolare nel tempo a seconda di determinate condizioni. In particolare si sta parlando di:

- curve temperatura-tempo
- curve di rilascio termico

Le curve temperatura-tempo sono le più utilizzate tradizionalmente e, come dice l'appellativo stesso, descrivono l'incendio attraverso la variazione della temperatura durante la combustione. Il tradizionale approccio prescrittivo prevede l'uso di curve nominali che tengono in considerazione tutto il compartimento (anche se molto grande) ma descrivono solo la fase di incendio pienamente sviluppato, tralasciando le fasi di ignizione, crescita e decadimento.

L'andamento della curva è sempre crescente. Di seguito, in Figura 3.3 è riportata la curva nominale standard (ISO 834) ma esistono altre tipologie di curva, una più severa per gli idrocarburi e una per gli incendi esterni.

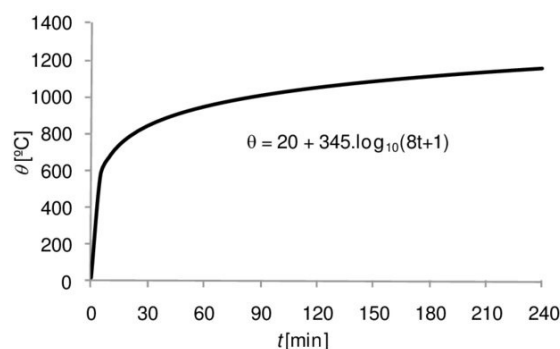


Figura 3.3: curva nominale standard (ISO 834) [21]

Le curve nominali forniscono risultati estremamente a favore di sicurezza, ma per questo motivo spesso risultano anche limitanti o particolarmente esigenti.

Perciò, con l'avvento dell'approccio prestazionale si è passati all'utilizzo delle curve 'naturali' di incendio che rispecchiano in maniera più verosimile l'evento reale, risultando così anche più accurate. Tengono conto delle caratteristiche dell'incendio e delle varie fasi di combustione, dal principio di ignizione fino al completo decadimento. Il carico incendio e l'apporto d'aria hanno un'influenza specifica su intensità e durata della combustione. Focolari alimentati da una

forte ventilazione raggiungono temperature più alte ma si esauriscono in un tempo minore rispetto a quelli che avvengono in condizioni ambientali neutre. Un carico di incendio maggiore invece determina sia un innalzamento della temperatura di picco che un ritardo nella fase di decadimento. Le figure di seguito rappresentano quanto appena detto. La Fig. 3.4 rappresenta un confronto fra casi caratterizzati da diverse ventilazioni e carico incendio costante. Diversamente, la Fig. 3.5 rappresenta un confronto fra prove caratterizzate da carico incendio variabile e ventilazione costante. In quest'ultimo caso, le curve sono affiancate anche alla suddetta curva nominale standard.

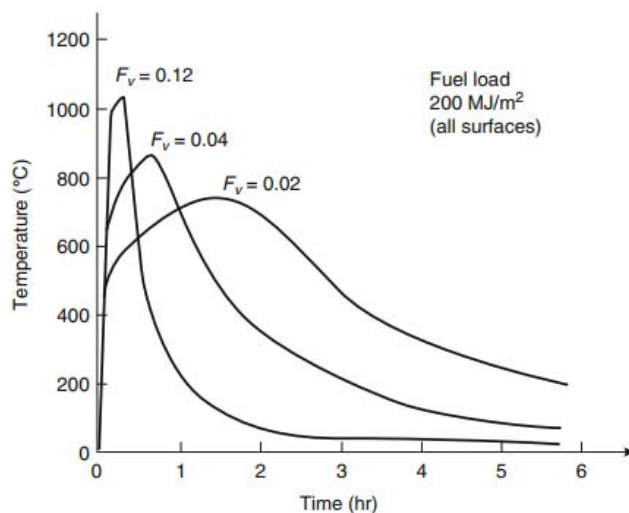


Fig. 3.4: curve temperatura-tempo da prove sperimentali con fattore di ventilazione variabile e carico incendio costante (pari a 200 MJ/m² su tutta la superficie) [18.c]

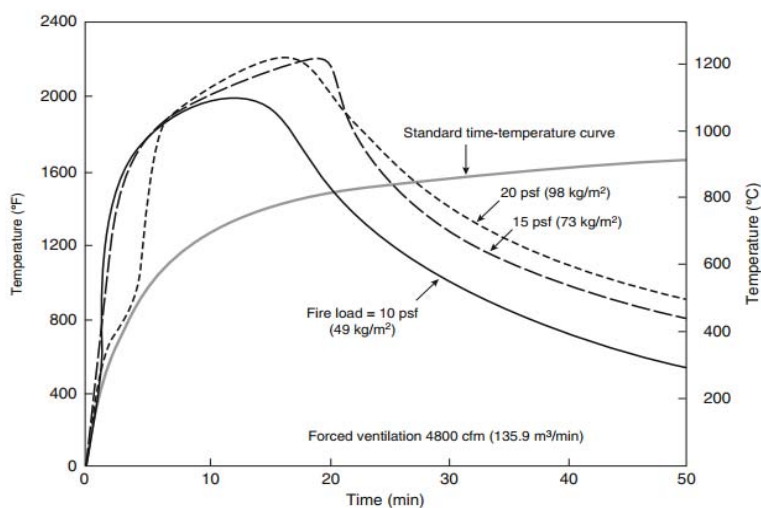


Figura 3.5: curva temperatura-tempo da prove sperimentali con carico incendio variabile e ventilazione costante [18.c]

L'altro tipo particolare di curve di cui si è parlato all'inizio di questo paragrafo riguarda le curve di rilascio termico. Definite anche HRR (Heat Release Rate) o RHR (rate of heat release) rappresentano la potenza termica rilasciata dall'incendio al variare del tempo e costituiscono uno strumento fondamentale nella moderna progettazione antincendio.

Il grafico riporta in ordinata i valori di potenza termica espressa in KW e in ascissa il tempo in secondi; anche in questo caso, la curva tiene conto del tipo e della quantità di combustibile impiegato, delle condizioni di ventilazione e delle caratteristiche geometriche del materiale. Inoltre, permette di stimare indirettamente la portata di fumo emessa durante la combustione. Occorre infatti specificare che la curva HRR non dà un'indicazione diretta in tal senso perché va implementata ad un adeguato modello che consenta di fare una stima dei fumi prodotti, tenendo altresì conto dell'ambito di applicazione e di eventuali limitazioni. Infine, l'area sottesa grafico rappresenta l'energia emessa dalla combustione; ciò trova giustificazione matematica perché così come integrando la curva nel dominio si ottiene l'area ad essa sottesa, analogamente integrando la potenza nel tempo di emissione si ottiene l'energia termica rilasciata. Il valore dell'energia emessa che può essere rilasciata è espressione della quantità di carico di incendio.

Si riporta di seguito l'esempio di una curva tipica di un incendio di compartimento.

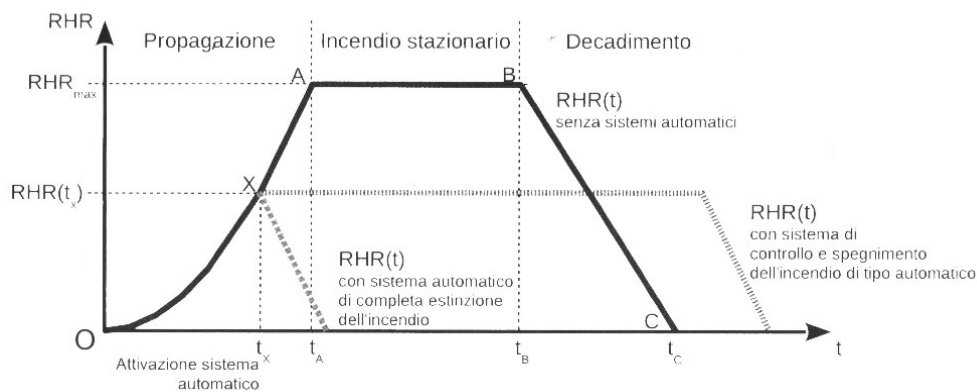


Figura 3.6: curva di rilascio termico per incendi di compartimento [22]

La curva in Fig. 3.6 presenta un andamento trapezoidale dove sono facilmente distinguibili le fasi di crescita, stazionarietà e decadimento dell'incendio. Nella fase di crescita la reazione è controllata dalla disponibilità di combustibile e la potenza termica emessa aumenta quasi in modo parabolico.

L'andamento della curva [23] può essere descritto come indicato nell'equazione seguente:

$$RHR = 1000 \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad (1)$$

dove:

RHR potenza termica rilasciata dall'incendio [KW]

t tempo [s]

t_α tempo necessario affinché la potenza rilasciata raggiunga il valore di 1000 KW
[s]

A seconda della tipologia, della natura e della disposizione dei materiali combustibili, si possono distinguere quattro diversi andamenti di sviluppo dell'incendio: lento, medio, rapido, ultra-rapido.

Ad ognuno di questi livelli è associata la velocità di crescita δ_α e il relativo tempo t_α , espresso in secondi, che la potenza termica impiega per raggiungere il valore di 1000 KW. I valori di δ_α e t_α si trovano in letteratura. Vengono qui presi in esame, a titolo esemplificativo, i valori suggeriti dal DM 03/08/2015 (*Nuovo codice di Prevenzione incendi*):

δ_α	Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio t_α [s]	Esempi
1	600 Lenta	Materiali poco combustibili distribuiti in modo discontinuo o inseriti in contenitori non combustibili.
2	300 Media	Scatole di cartone impilate; pallets di legno; libri ordinati su scaffale; mobili in legno; automobili; materiali classificati per reazione al fuoco (capitolo S.1)
3	150 Rapida	Materiali plastici impilati; prodotti tessili sintetici; apparecchiature elettroniche; materiali combustibili non classificati per reazione al fuoco.
4	75 Ultra-rapida	Liquidi infiammabili; materiali plastici cellulari o espansi e schiume combustibili non classificati per la reazione al fuoco.

Figura 3.7: Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio [23]

Ad un certo punto, l'incendio assume dimensioni tali coinvolgere tutto il compartimento. Quando la combustione passa allo stadio di incendio generalizzato (*flashover*), la disponibilità di aria presente nel compartimento diventa il fattore limitante. In questa fase dell'incendio la potenza raggiunge il suo valore massimo e su questo si stabilizza. Con riferimento alla Fig. 3.6 ciò equivale da dire che:

$$RHR(t) = RHR_{max} \text{ per } t_A \leq t \leq t_B \quad (2)$$

Nel caso in cui lo sviluppo dell'incendio sia controllato dal combustibile, come potrebbe accadere se il compartimento ha dimensioni molto grandi, elevata disponibilità di ventilazione e energia insufficiente a raggiungere *flashover*, allora il valore massimo di potenza termica rilasciata si esprime come indicato nell'equazione (3).

$$RHR_{max}=RHR_f A_f \quad (3)$$

dove:

RHR_f = valore della potenza termica massima rilasciata per unità di superficie lorda
[KW/m²]

A_f = superficie lorda del compartimento in caso di distribuzione uniforme del carico incendio, oppure superficie lorda effettivamente occupata dal combustibile [m²]

Questa formulazione può essere valida anche per i casi di incendio all'aperto.

La fase stazionaria prosegue fino a quando il combustibile stesso non inizia ad esaurirsi, dando avvio alla fase di decadimento. Negli incendi di compartimento, se si raggiungono le condizioni di incendio generalizzato la fase stazionaria perdura fino a che non sia stato rilasciato il 70% dell'energia termica inizialmente disponibile e ciò può corrispondere anche a un periodo lungo decine di minuti. Contrariamente se l'energia termica iniziale non è sufficiente a superare la fase di propagazione, la curva di rilascio termico raggiunge il picco, mantiene il valore massimo per qualche secondo e poi inizia direttamente la sua fase di decadimento. Un andamento analogo a quest'ultimo si riscontra per incendi all'aperto, dove la propagazione interessa tutto il materiale che trova a disposizione e brucia fino a quando il combustibile non si esaurisce.

In una curva ricavata da prova sperimentale, in realtà, le fasi non sono altrettanto distinguibili. Si vedano ad esempio le due figure riportate di seguito, Fig. 3.8 e Fig. 3.9, dove sono rappresentate le curve di rilascio termico registrate durante prove sperimentali di combustione effettuate in laboratorio.

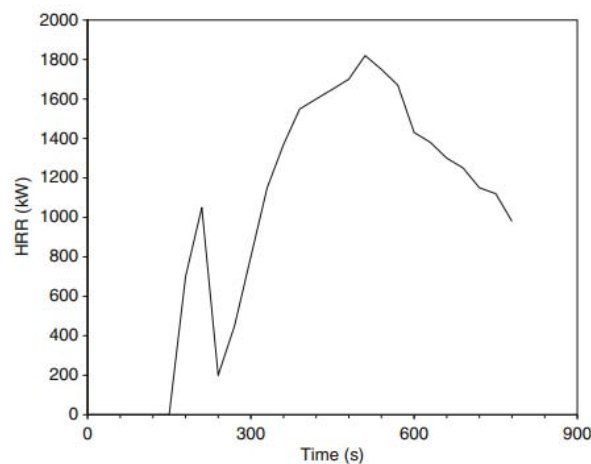


Figura 3.8: curva di rilascio termico ottenuta da prova sperimentale durante la combustione di pannelli di polistirene espanso (dimensioni complessive blocco 1.2 x 1.2 x 1.2 m, 1.4kg) [18.d]

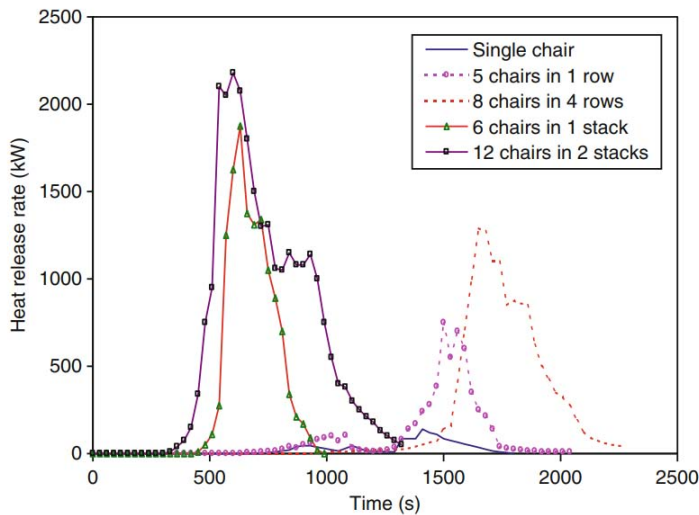


Figura 3.9: curva di rilascio termico ottenuta da prova sperimentale durante la combustione di differenti pile di sedie in polietilene (con supporto in ferro, no imbottitura) [18.d]

Nella definizione quantitativa del fenomeno, risulta molto utile servirsi di curve HRR realistiche basate su dati sperimentali. Ciò spesso risulta poco praticabile perché da un lato difficilmente si può disporre di un laboratorio di prova e dall'altro utilizzare in seguito i dati di letteratura comporta un complesso studio di giustificazione in merito ai criteri di applicabilità della curva specifica al contesto in analisi. Si sottolinea però che soprattutto per quanto concerne gli incendi all'aperto, c'è una grande necessità di raccogliere dati sperimentali per poter aumentare e approfondire la conoscenza del fenomeno. Come si sarà potuto notare infatti, dopo aver introdotto la distinzione tra incendi di compartimento e incendi all'aperto, pochissimo è stato detto su questi ultimi.

È vero che vale l'ipotesi generale secondo cui la combustione in campo aperto sia assimilabile ad un incendio di compartimento nella sua fase di sviluppo iniziale (ossia in quella fase in cui pirolisi e rilascio di energia sono influenzati solo dal combustibile) ma ciò non è sufficiente. I due scenari di incendio all'aperto e incendio in ambiente confinato si distinguono nettamente l'uno dall'altro per come influiscono in maniera differente sull'evoluzione della combustione.

A tal proposito si riporta in tabella un breve confronto tra le caratteristiche principali di un incendio di compartimento e un incendio in campo aperto. (§Tab. 3.1)

Tabella 3.1: confronto fra le principali caratteristiche di combustione di un incendio di compartimento e incendio in campo aperto

	Incendio di compartimento	Incendio in campo aperto
Carico di incendio	Generalmente presente in quantità contenute; viene separato in compartimenti diversi o, nel caso di compartimenti di grandi dimensioni, opportunamente distanziato per limitarne il coinvolgimento durante la propagazione	Con particolare riferimento agli incendi nei siti di deposito e stoccaggio, è presente in grandi quantità, talvolta stoccato in grandi cumuli altre volte immagazzinato sottoforma di ecoballe in parchi di stoccaggio dalle dimensioni molto estese
Disponibilità di ventilazione	Generalmente limitata nelle fasi avanzate della combustione, può costituire un fattore limitante allo sviluppo dell'incendio	Disponibile in quantità abbondante e illimitata
Possibilità di creare una compartimentazione	Come dice chiaramente il nome della categoria stessa, è possibile creare dei compartimenti, ossia far sì che anche locali adiacenti restino indipendenti tra loro per un certo periodo iniziale della combustione e non interagiscano favorendo la propagazione dell'incendio ma che, al contrario, riescano a contenere gli effetti del focolare per un tempo stabilito.	Trovandosi all'aperto, è intrinseco nella natura del sito di deposito che non ci siano separazioni di alcuna sorta e che anche gli eventuali muri che separano una piazzola da un'altra, non presentino alcun effetto di contenimento nei confronti dell'incendio.
Possibilità di controllo dell'incendio	Trovandosi in luogo chiuso e confinato è maggiore la possibilità di riuscire ad intervenire efficacemente sulla combustione con operazioni di controllo dell'incendio. Inoltre è probabile che nel compartimento siano presenti degli impianti di controllo ed estinzione dell'incendio.	Nei siti di deposito e stoccaggio dei materiali solidi non infiammabili, non sono ad oggi previsti impianti di controllo o spegnimento automatico dell'incendio. Non sono altresì disponibili tecnologie di rilevazione e allarme incendio, di uso comune. (In quest'ultimo caso sarebbe possibile usare le termocamere ma l'impiego è ancora strettamente vincolato a condizioni particolari di utilizzo).

In particolare risulta importante sottolineare nuovamente quale sia il ruolo della ventilazione. Come visto fino a qui, un incendio caratterizzato da un'abbondante disponibilità di aria si porta velocemente a regime e ha più probabilità di rimanervi. Più specificatamente, in condizioni di combustione in campo aperto la ventilazione non costituirà mai il fattore limitante; una volta innescato, l'incendio tende a propagarsi velocemente andando ad interessare tutta la massa del combustibile. Così, anche una grande quantità di materiale combustibile può bruciare ed emettere energia termica in tutta la sua totalità. Questo fattore in particolare distingue un incendio all'aperto da uno di compartimento e lo rende più pericoloso. In un locale chiuso infatti, anche ammesso che l'incendio abbia l'energia sufficiente per interessare tutto il compartimento, per poter bruciare nella sua totalità deve disporre di una sufficiente quantità di aria. Ne risulta che, tendenzialmente, un incendio all'aperto può essere molto più pericoloso per le quantità di materiali coinvolti e per l'intensità con cui irraggia energia termica durante la combustione.

Inoltre, un altro fattore di criticità riguarda la possibilità di controllo dell'incendio, come già anticipato in Tab. 3.1. Le tecniche di spegnimento principali si basano su: esaurimento del combustibile, raffreddamento, soffocamento e azione chimica. In un incendio di compartimento, possono essere usate tutte queste tecniche e spesso sono presenti degli impianti di rivelazione automatica dell'incendio che rendono possibile identificare l'incendio già nelle primissime fasi di evoluzione. Inoltre, impianti automatici (come ad esempio sprinkler) intervengono abbassando le temperature e bagnando le superfici adiacenti, così da limitare fortemente la propagazione. Non si può dire altrettanto di un impianto di deposito e stoccaggio, dove non è possibile applicare tutte le tecniche sopracitate e dove si interviene manualmente servendosi delle reti idranti o delle squadre di soccorso specializzato, comportando un'inevitabile dilatazione dei tempi di intervento.

Insomma, risulta evidente che ci si trova di fronte a due scenari profondamente diversi. Per tale ragione non è quindi possibile applicare agli incendi all'aperto le nozioni, apprese e consolidate, valide per l'incendio di compartimento. Fondamentale, quindi, approfondire le conoscenze ricavando dati sperimentali ad oggi scarsi e quasi nulli in letteratura. Da qui nasce l'esigenza di delineare quali siano i confini e gli elementi cardine che caratterizzano l'ambito di applicazione dell'incendio in campo aperto, per poter poi identificare gli obiettivi e tracciare le linee conduttrici dello studio sperimentale. Nel frattempo, per condurre una progettazione di alto livello è possibile appoggiarsi a software computazionali per implementare elaborazioni complesse su combustione e rilascio di sostanze tossiche, anche nel caso di incendi in condizioni di campo aperto.

3.2 I software di fluidodinamica computazionale. L'utilizzo di FDS e SMOKEVIEW

Per facilitare e migliorare la progettazione, si è cercato di descrivere i fenomeni fisico-chimici dell'incendio, approfonditi nei paragrafi precedenti, in maniera oggettiva e riproducibile, ad esempio tramite l'utilizzo di equazioni matematiche. In svariati campi dell'ingegneria, è infatti ormai pratica comune affiancare alla trattazione tradizionale un'analisi destinata all'implementazione informatica che combini il modello fisico in studio e metodi numerici. I vantaggi che ne derivano sono svariati e fra i principali è possibile citare la possibilità di eseguire anche elaborazioni complesse in tempi relativamente brevi.

3.2.1 – Ragioni di utilizzo dei software CFD

La fluidodinamica computazionale (CFD) è lo studio che analizza il movimento dei fluidi all'interno di un sistema e le dinamiche che si innescano come reazioni chimiche, scambi termici o di sostanze. Proprio sulla base della CFD, sono stati sviluppati alcuni programmi informatici dedicati specificatamente alla modellazione dei fenomeni di combustione. Sul mercato sono disponibili molteplici versioni che permettono di effettuare calcoli e simulazioni fluidodinamiche relativamente a tutto lo sviluppo dell'incendio, rendendo possibile una restituzione grafica di facile interpretazione.

Tra i principali, si ritiene opportuno citare:

Fire Dynamics Simulator (FDS)	modella scenari di incendio basandosi sui processi di calcolo della fluidodinamica computazionale; è sviluppato dai ricercatori del NIST (National Institute of Standard and Technology).
CPI win FSE	È in grado di descrivere fisicamente il dominio di calcolo e lo scenario di incendio. Viene utilizzato nel campo della sicurezza antincendio per la simulazione degli incendi e l'evacuazione delle persone. Per l'effettuazione dei calcoli si appoggia a FDS.
CFAST	è un modello a (due) zone; calcola la distribuzione e l'evoluzione del fumo e dei gas di combustione nelle due zone in cui suddivide l'ambiente.
Smartfire	Modello di CFD sviluppato appositamente per l'utilizzo nella progettazione antincendio

OpenFOAM Modello di CFD sviluppato appositamente per l'utilizzo nella progettazione antincendio

Fluent e StartCD Compiono entrambi elaborazioni di fluidodinamica computazionale. Tuttavia non nascono prettamente nel mondo dell'antincendio ma per via della loro versatilità sono stati adattati anche all'uso nel campo della progettazione antincendio

Ai fini della presente trattazione si è ritenuto opportuno utilizzare FDS (Fire Dynamics Simulator) un software di tipo open source (cioè non protetto da copyright dunque gratuito e di facile accesso) sviluppato dai ricercatori del National Institute Of Standard and Technology (NIST) in collaborazione con il VTT finlandese.

3.2.2 Caratteristiche principali di FDS: potenzialità e limiti

Tra i diversi software disponibili sul mercato, FDS vanta potenzialità molto importanti, in aggiunta alla sua gratuità. Si tratta di un software di fluidodinamica computazionale che risolve equazioni di bilancio secondo un approccio sia di tipo LES (*Large Eddy Simulation*) che DNS (*Direct Numerical Simulation*). Queste due modalità sono mutuamente esclusive e la specifica scelta è guidata dal livello di dettaglio richiesto dalla simulazione. Ad esempio, mentre l'approccio LES è più che adeguato per la simulazione di uno scenario di incendio con interesse verso le principali sue variabili, una simulazione DNS è richiesta qualora sia necessario indagare aspetti dettagliati riguardanti la dinamica delle fiamme e dei fronti di reazione.

Con questo software è possibile modellare in tutte le sue fasi un incendio. Occorre però specificare che FDS nasce con lo scopo di modellare un incendio in ambiente confinato o al più semi-confinato. Tuttavia il software, in occasione di validazioni di dati sperimentali, ha mostrato potenzialità non sfruttata anche in ambiente non confinato.

In linea generale, il software offre le seguenti possibilità:

- modellazione della pirolisi e della combustione;
- supporto alla definizione di materiali combustibili personalizzati nonché all'implementazione di svariati approcci per la gestione della curva di incendio;
- studio dell'effetto dei sistemi di controllo ed estinzione di un incendio.

Più nel dettaglio, FDS permette di modellare una combustione a partire dalla fase di innesco tenendo conto di quantità e tipologia dei materiali coinvolti, distribuzione del carico di incendio, condizioni ambientali atmosferiche, geometria e configurazione dello spazio, fino alla fase di

Le modifiche possono essere apportate tramite finestre di dialogo o, limitatamente a certi aspetti, direttamente sullo spazio di disegno. Contemporaneamente alla fase di costruzione dello scenario, il programma genera automaticamente un file di testo che può essere estrapolato e modificato anche utilizzando un secondo metodo che sarà indicato successivamente. Inoltre, Pyrosim® ha il vantaggio di poter visualizzare in tempo reale la geometria del modello e la disposizione degli elementi di controllo inseriti nel dominio (come sonde, piani di osservazione). Si contraddistingue anche per la capacità di fornire visualizzazione dell'elaborazione finale senza servirsi di altri programmi.

Il secondo metodo, molto più usato, prevede il set-up dei dati di ingresso manualmente ovvero mediante riga di comando. Tutte le informazioni necessarie all'elaborazione sono inserite in un file di testo, utilizzando la sintassi appropriata. Per produrre le simulazioni oggetto del presente elaborato si è fatto ricorso all'uso di Notepad++, un editor di testo sviluppato per Windows che contiene all'interno della sua libreria anche il linguaggio di FDS. Per compilare il file è infatti necessario utilizzare un codice di programmazione specifico. Ogni riga, che risulta numerata, va compilata iniziando con un '&' e terminando con '/': solo ciò che è compreso fra questi due simboli verrà letto e considerato dal programma, tutto il resto ignorato ma potrà comunque essere lasciato a corredo se utile all'utente.

Ogni stringa di comando è caratterizzata da un '*namelist group*' cioè da una parola chiave che apre alla trattazione di un aspetto specifico della simulazione, permette di strutturare il file e organizzare l'inserimento degli input. I *namelists* '&HEAD/' e '&TAIL/' segnano rispettivamente l'inizio e la fine del testo. I principali *namelists* permettono di descrivere lo

```

1  PROVA DI COMBUSTIONE
2  Matrice omogenea con materiale plastico. Utilizzo di polistirene (C8H8)n.
3  Simulazione in campo aperto con presenza di vento.
4
5
6  &HEAD CHID='PS_proval' /
7
8  &MESH ID='Mesh01', IJK=20,100,40,   XB=0.0,10.0,0.0,50.0,0.0,20.0/
9  &MESH ID='Mesh02', IJK=10,50,20,   XB=0.0,10.0,0.0,50.0,20.0,40.0/
10 &MESH ID='Mesh03', IJK=140,50,40,  XB=10.0,150.0,0.0,50.0,0.0,40.0/
11
12 &TIME T_END=300.0, DT=0.01 /
13
14 &WIND L=-100.0,
15      DIRECTION=270,
16      SPEED=1.0,
17      Z_0=1.0, Z_REF=10.0/
18
19
20 &SPEC ID='POLYSTYRENE', FORMULA = 'C8H8' /
21 &MATL ID='POLYSTYRENE',
22     DENSITY=1050,
23     CONDUCTIVITY=0.14,
24     SPECIFIC_HEAT=1.25 / emissivity lasciato valore di default 0.9
25     dati presi da Tab. A.36 p. 3456 SFPE Handbook, PS
26
27 &SPEC ID='OXYGEN',          LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE. /
28 &SPEC ID='NITROGEN',       LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE. /
29 &SPEC ID='CARBON DIOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE. /
30 &SPEC ID='WATER VAPOR',    LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE. /
31 &SPEC ID='CARBON MONOXIDE', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE. /
32 &SPEC ID='SOOT',          LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE. /
33
34 &SPEC ID='AIR',

```

Figura 3.12: ambiente di lavoro di NOTEPAD++ ed esempio di file di testo compilato con linguaggio FDS

spazio di lavoro (&MESH/), le caratteristiche del materiale (&MATL/) e della reazione (&REAC/), le condizioni ambientali (&WIND/) e varie altre cose. Cosa è stato utilizzato ai fini della simulazione verrà spiegato più avanti. Si inserisce di seguito, in Fig. 3.12 un esempio rappresentativo dello spazio di lavoro in Notepad++ per facilitare la comprensione di quanto appena descritto.

Il file così prodotto ha un'estensione di tipo '.fds' e viene letto direttamente dal programma FDS.

Le elaborazioni computazionali di FDS sono usufruibili dall'utente a mezzo di un post-processore grafico, cioè un programma di supporto che permette di ottenere visualizzazioni grafiche in due o tre dimensioni dei parametri in analisi. Il programma in questione si chiama Smokeview (SMV), è un modulo complementare a FDS ed ugualmente distribuito dal National Institute Of Standard and Technology (NIST). Le rappresentazioni grafiche permettono di visualizzare lo sviluppo e la distribuzione realistica di un pennacchio di fumo nello spazio del dominio. È possibile inoltre vedere i flussi di calore e di sostanze emesse dalla combustione su dei piani di controllo, dove vengono riprodotti in diversi colori a seconda del valore che assumono.

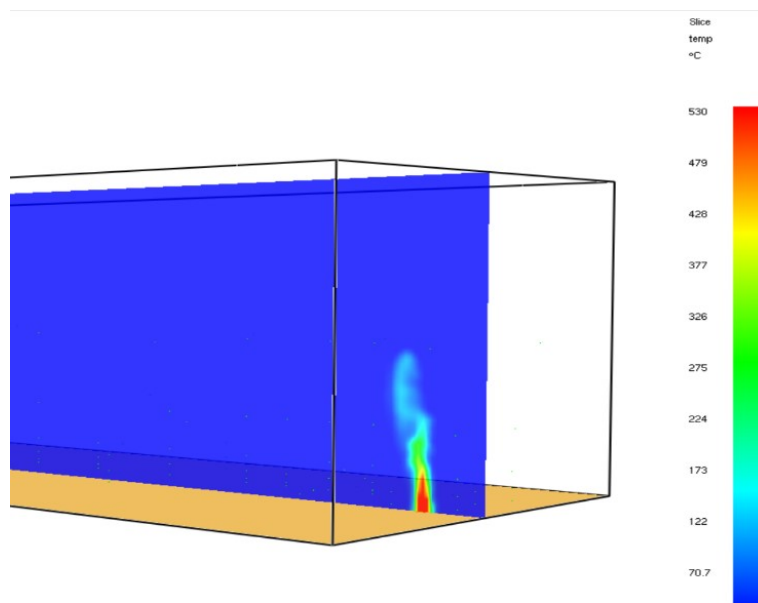


Figura 3.14: esempio di visualizzazione del campo di temperature su una sezione piana del dominio, con l'utilizzo di Smokeview

Sia FDS che SMW sono stati oggetto di numerosi studi di validazione da parte di soggetti interni al NIST e di enti esterni; pertanto utilizzo e affidabilità sono ormai comprovati con sufficiente accuratezza.

Resta tuttavia onere dell'utilizzatore il corretto set-up dei dati in ingresso e dei dati in uscita. Fondamentali sono l'appropriatezza degli input e la corretta interpretazione degli output.

Un'altra importante responsabilità dell'utente consiste nel trovare il giusto equilibrio tra livello di accuratezza del risultato e conduzione della prova. FDS risolve numericamente le equazioni che modellano la reazione di combustione e i relativi fenomeni di trasporto nel dominio con il metodo ai volumi finiti. La precisione del risultato ottenuto dall'elaborazione è quindi sensibilmente dipendente dalle dimensioni del dominio e dal grado di raffinatezza con cui questo viene discretizzato. Occorre perciò condurre quella che viene definita un'analisi di sensibilità sulla griglia (*mesh sensitivity analysis*), cercando di ottenere il minor numero possibile (ma comunque ragionevole) di elementi che riescano a fornire risultati significativi senza rendere eccessivamente difficoltoso il calcolo.

Un altro aspetto che può compromettere la gestione del calcolo ha a che fare con il tempo di simulazione. L'utente può richiedere che l'elaborazione faccia una predizione degli effetti dell'incendio per un periodo a piacere, definito in secondi, più o meno breve. Ovviamente impostare che la simulazione riproduca gli effetti della combustione per un periodo lungo richiede anche un tempo di elaborazione maggiore, andando a gravare sull'utilizzo del programma.

Per quanto appena visto, l'utente è tenuto a scegliere accuratamente tali aspetti in modo da ottenere agevolmente dei risultati realistici e convergenti con il modello in maniera soddisfacente.

Nel capitolo successivo verranno illustrate nel dettaglio quali siano state le scelte adottate nelle simulazioni svolte ai fini del presente elaborato.

Capitolo 4

Simulazioni di incendi di rifiuti

Nella presente trattazione è stato utilizzato il software di calcolo FDS per riuscire a modellare eventi di combustione in campo aperto. Di seguito verranno illustrati i parametri che sono stati utilizzati ai fini dell'elaborazione e i criteri che hanno determinato la scelta di tali valori.

Si ritiene importante specificare che la trattazione non prende in considerazione siti di deposito e stoccaggio realmente esistenti. Tuttavia, le condizioni dei casi presi in esame rispecchiano in modo realistico e verosimile la realtà, riuscendo così a fornire dei risultati di carattere generale di maggiore fruibilità.

4.1 Scelta dei dati di input e dei parametri della simulazione

4.1.1 Le matrici sorgente

Come anticipato nel Cap. 2, risulta contingenza dei nostri tempi iniziare il percorso di indagine dalle matrici di materiale plastico polimerico.

Le tipologie selezionate ai fini della presente trattazione sono delle comuni matrici polimeriche presenti in siti di deposito e stoccaggio ovvero:

1. Polietilene (PE)
2. Polipropilene (PP)
3. Polistirene (PS)
4. Cloruro di polivinile (PVC)

Per le proprietà dei singoli materiali si rimanda alla Tab. 2.1 del Cap. 2; le caratteristiche specifiche utilizzate ai fini delle simulazioni verranno invece specificate di seguito.

I materiali selezionati sono stati considerati singolarmente in matrici omogenee ovvero il relativo termine sorgente è stato inizialmente implementato come costituito al 100 % in massa dallo specifico materiale combustibile selezionato tra quelli sopraelencati.

A ciascun materiale indicato, anche ai fini della simulazione, sono state associate le proprietà [18.e] di densità [kg m^{-3}], calore specifico [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$], conducibilità termica [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] ed emissività⁸ [-].

⁸ L'indice della capacità di un corpo di irraggiare energia esprime la frazione di energia irraggiata dal corpo in esame rispetto all'energia irraggiata da un corpo nero nelle stesse condizioni di temperatura; assume valori tra 0 e 1.

Tabella 4.1: valori di densità, calore specifico e conducibilità per polietilene, polipropilene, polistirene e polivinilcloruro. Dati desunti da SFPE Handbook, Appendix III 'Fuel properties and Combustion Data', tab. A.36 - Thermal properties and thermal response parameter values of polymers, p. 3456

	PE	PP	PS	PVC
densità [kg/m ³]	930	960	1050	1950
calore specifico [kJ/(kg K)]	1.55	2.16	1.25	1.38
conducibilità termica [W/mK]	0.34	0.20	0.14	0.26

Va osservato, relativamente ai materiali indicati, che essi non rientrano tra quelli standard presenti in FDS e pertanto, sia dal punto di vista fisico che chimico, richiedono una definizione. Tale definizione da un lato ha riguardato le generali proprietà termiche ovvero la conducibilità termica e il calore specifico, intese come costanti, e dall'altro del comportamento delle rispettive matrici alla combustione. Riguardo l'emissività, è stata conservata ad un valore di default di 0.9.

4.1.2 Definizione del dominio

Ai fini dell'elaborazione è stato necessario definire un dominio, ossia fissare i confini dello spazio di controllo all'interno del quale lavora il software. Infatti, qualsiasi programma di calcolo non può agire su uno spazio infinito ma applica i propri meccanismi di calcolo ad un volume definito dall'utente.

Per l'analisi in corso, si è scelto un dominio con base di forma rettangolare delle dimensioni di 150 m lungo la direzione X e 50 m lungo la direzione Y. Il volume si sviluppa in altezza per 40 m lungo la direzione Z. Nella Figura 4.1 è riportato un prospetto del dominio. Le linee gialle rappresentano i confini dello spazio di controllo.

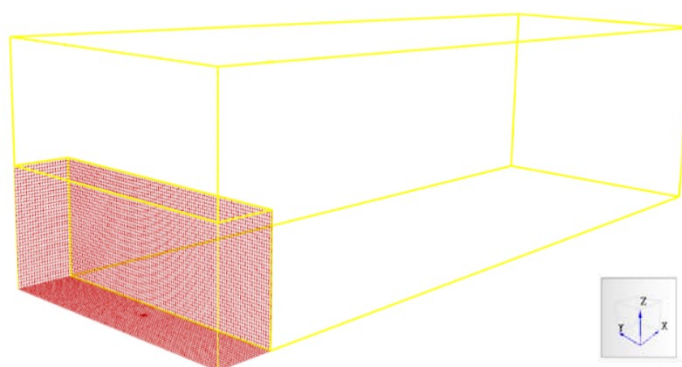


Figura 4.1: prospetto del dominio di controllo impiegato nelle simulazioni. Le linee gialle rappresentano i confini del volume. La zona rossa, invece, rappresenta la porzione di spazio dove si è ritenuto necessario aumentare l'accuratezza del calcolo.

Per rendere il dominio di studio in linea con una tipica condizione reale di non confinamento, esso è stato caratterizzato con i seguenti elementi:

- un piano di ingresso, utilizzato per inserire un campo di moto stazionario del vento;
- un piano di uscita, secondo direzione prevalente imposta nel campo di moto del vento;
- piani ausiliari di confine (laterali e superiori) rispettosi di una condizione di assenza di perturbazioni che potrebbero diffondersi, sia dal punto di vista fluidodinamico che numerico, nel sistema.

I comandi FDS utilizzati per la definizione delle proprietà sopra riportate sono 'periodic', 'inert' e 'open'. Ciascuno di essi, sia dal punto di vista fisico che numerico, impone determinate condizioni al contorno così come riportato in Tabella 4.x. Tali condizioni al contorno completano l'approccio numerico LES al campo fluidodinamico turbolento.

Tabella 4.x: Dominio di calcolo, condizioni al contorno utilizzate.

<i>Namelist</i>	Bordo del dominio di applicazione	Tipologia di condizione al contorno	Note numeriche
'open'	Bordo superiore aperto	Apertura passiva verso l'esterno del dominio secondo gradiente locale di pressione	Imposizione di "ghost cells" per garantire un flusso indisturbato, "zero-gradient condition".
'periodic'	Superfici laterali	Apertura verso l'esterno con condizioni periodiche per riprodurre l'inserimento del dominio di studio in un contesto ad estensione più ampia	Imposizione di proprietà uguali alle facce in accoppiamento periodico. La distanza minima delle facce è selezionata da garantire affidabilità numerica ovvero almeno maggiore del doppio della dimensione caratteristica del più grande "LES eddy" atteso.
'inert'	Superficie di base	Condizione al contorno per superficie solida in condizioni ambiente ma non adiabatica.	Condizione tipo Dirichlet di settaggio della temperatura a condizioni ambientali normali.

Ad ogni piano di confine del dominio è stata dunque associata una proprietà. I piani laterali sono stati definiti con il comando 'periodic' assumendo così che lo spazio si ripeta all'infinito lungo le direzioni X e Y. Il piano superiore di confine è stato designato con il comando 'open': questo crea un'apertura passiva e totalmente ininfluente rispetto ai flussi ascensionali che si instaurano durante la combustione e che possono trovarsi ad attraversare il confine dello spazio di controllo. Al bordo inferiore, corrispondente al suolo, è stata assegnata la dicitura 'inert' per indicare che si tratta di una superficie solida, sostanzialmente liscia che

resta estranea ai processi di combustione e le cui proprietà non sono di interesse ai fini della simulazione ma che contribuisce alla conservazione del bilancio di energia.

Al dominio di calcolo, con lo scopo di inizializzare e impostare un campo di moto del vento, è stato imposto il comando `wind=.true.`. Ciò impartisce a FDS di estendere in tutte le direzioni le condizioni meteorologiche descritte all'interno del dominio. In tal modo la simulazione viene condotta conservando la realistica del moto del vento senza interferenze numeriche con l'evoluzione dello scenario incendiario in studio. Ulteriori dettagli sul campo di moto di vento sono riportati nella sezione 4.1.4.

La suddivisione in celle di calcolo del dominio (*meshing*) è stata realizzata secondo due criteri:

- garantire un risultato affidabile, non sensibile alla mesh (*mesh sensitivity analysis*)
- soddisfare le condizioni di stabilità numerica degli algoritmi per la risoluzione delle equazioni non stazionarie secondo approccio *Large Eddy Simulation* (LES)
- evitare sovrapposizioni di celle e difetti nella disposizione delle celle all'interno del dominio di calcolo.

Data l'uniformità del dominio di calcolo è stata adottata una griglia strutturata (*structured mesh*) costituita da elementi cubici di lato variabile. Sulla base delle considerazioni sull'accuratezza fatte nel Capitolo 3, si è dunque deciso di suddividere il dominio di calcolo come segue:

- celle della dimensione di 1m x 1m su tutto il dominio eccetto la zona rossa (Fig. 4.1)
- celle della dimensione di 0,5m x 0,5m nella zona identificata rossa

In riferimento alla Figura 4.1, la zona rossa rappresenta un volume adiacente al fuoco dove si è ritenuto opportuno intensificare l'accuratezza del calcolo e quindi infittire la *mesh* allo scopo innanzitutto di sostenere un'accurata simulazione del termine sorgente di incendio. Le dimensioni di questo volume sono pari a 10 x 50 x 20m.

Infine, la scelta di queste dimensioni caratteristiche della *mesh* consentono la garanzia di stabilità basata sul numero di *Courant-Friedrichs-Levy* (CFL) che per tutte le simulazioni è inferiore a 1.

4.1.3 Rappresentazione del termine sorgente incendio

Per rappresentare il corpo soggetto a combustione, si è ricorsi all'utilizzo di un 'vent' ossia di un elemento piano a cui si sono applicate delle particolari caratteristiche. Questa trattazione è la stessa riservata ai piani di confine del dominio già citati sopra; tuttavia la modalità di descrizione e le informazioni inserite sono di natura diversa perché associate alla combustione e dunque all'incendio.

In questo lavoro, le dimensioni geometriche del termine sorgente sono pari ad 1 m, ad identificare potenziali sorgenti sia superficiali che volumiche di 1 m di lato.

Solo in un paio di simulazioni i lati del *vent* sono stati aumentati fino ad assumere lunghezze pari a 5m nel primo caso e pari a 10m nel secondo caso. Alla luce di questa modifica, si è ritenuto necessario aumentare anche le dimensioni dello spazio di controllo, che è invece rimasto invariato nella forma (§Fig. 4.1). Il volume del dominio, solo ed esclusivamente per questi casi, ha dimensioni 200x70x70 m.

In corrispondenza del termine sorgente sono state imposte condizioni iniziali e al contorno rispettivamente di natura:

- termica per quanto riguarda il calore e la potenza emessi dallo scenario di incendio
- chimica per quanto concerne la reazione chimica sottesa alla combustione del materiale che costituisce la matrice.

Come illustrato meglio oltre, ad ogni superficie di ‘vent’ vengono dunque assegnate delle proprietà caratteristiche del materiale plastico oggetto della prova.

Relativamente alla parte termica, è stato fatto uso di dati e correlazioni da letteratura [25] con lo scopo primario di quantificare e identificare un tipico flusso massivo atteso a sostenere lo scenario di incendio. È infatti tale aspetto ad essere rilevante, nel fenomeno della combustione, giacché riproduce l’emissione di vapori e gas di pirolisi che si liberano dalla decomposizione della matrice. Nel lavoro in esame, non è stata modellata la pirolisi per via della complessità del fenomeno sotteso e per la carenza di dati e modelli riguardanti materiali plastici di interesse per questo studio.

Per il calcolo del flusso massivo, sono disponibili diverse metodologie da letteratura. A titolo di conservatività, è stato scelto di adottare l’approccio che determina il valore maggiore.

A partire dunque dai valori riportati in Tab. 4.2 relativi a *total heat release* HRR ed entalpia di combustione, è stata applicata la seguente formula valevole per la sostanza *i*-esima sia per matrici omogenee che miscele:

$$\dot{m}_i = \frac{HRR}{A} \frac{1}{\Delta H_{comb}} \quad (1)$$

Dove:

\dot{m}_i : valore di flusso massico	[kg/(m ² s)]
<i>HRR</i> : <i>heat release rate</i> totale	[kW]
<i>A</i> : area del fuoco ossia l’area sede della combustione	[m ²]
ΔH_{comb} : calore di combustione del combustibile	[kJ/kg]

In sostanza, l’equazione (1) consente di valutare sulla base del tipico valore di HRR atteso, il corrispondente flusso massivo stazionario di base per garantire l’effetto termico correlato. La

stessa formula può essere adattata anche a miscele eterogenee qualora al valore di HRR complessivo ciascun combustibile i-esimo contribuisca in maniera parziale.

Tabella 4.2: valori di HRR e calore di combustione impiegati nella definizione dei flussi massivi del termine sorgente [25].

	HRR [kW]	ΔH_{comb} [kJ/kg]
Polietilene	2735	43400
Polipropilene	2421	42600
Polistirene	1555	35800
polivinilcloruro	191	8900

Va sottolineato che i dati riportati in Tabella 4.2 sono basati su prove sperimentali condotte secondo metodologia calorimetrica a cono e in condizioni al contorno confrontabili [25], rendendo di fatto i dati omogenei ed utilizzabili per questo studio.

Ulteriori affinamenti dell'approccio qui discusso si possono basare su contributi al flusso massivo variabili nel tempo ed implementabili mediante il comando 'RAMP' che di fatto implementa un profilo temporale della variabile in esame. Tale approccio tuttavia è stato scartato per l'assenza, in letteratura, di curve dinamiche applicabili al caso in esame. Su questo aspetto è necessaria un'attività di sperimentazione tesa ad indagare il comportamento dinamico al fuoco di matrici plastiche.

4.1.4 Condizioni ambientali al contorno

Per rendere le simulazioni realistiche si tiene conto delle principali condizioni climatiche e atmosferiche. Il fattore su cui si riversa maggior attenzione è la presenza di vento soprattutto in riferimento al fenomeno di dispersione dei fumi di combustione.

I prodotti e i sottoprodotti della combustione che si liberano a seguito dello scenario di combustione hanno una tendenza alla dispersione che risente sia delle loro proprietà fisiche che di quelle indotte dal campo locale di moto del vento.

Ai fini del presente studio sono state condotte simulazioni con diversi valori di velocità media del vento, considerato però agente sempre lungo la direzione X (direzione prevalente di sviluppo del dominio).

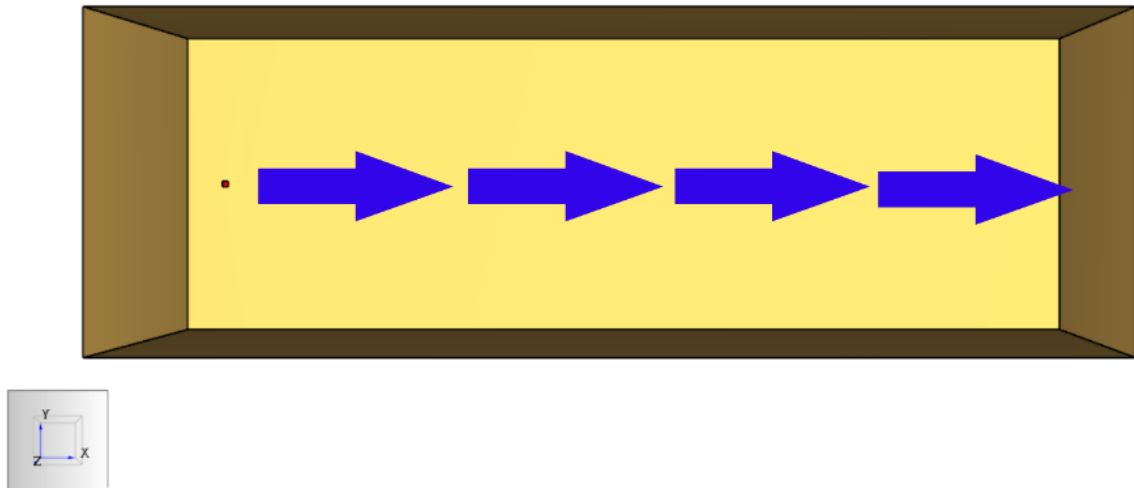


Figura 4.2: Direzione prevalente del vento nel dominio

I valori di velocità selezionati sono i seguenti:

- 1 m/s corrispondente al valore 1 sulla Scala di Beaufort⁹. Condizione di vento debole che inclina leggermente il fumo ma non ha effetto sulle maniche a vento¹⁰;
- 4 m/s corrispondente al valore 3 sulla Scala di Beaufort. Condizione di vento che crea elementi di turbolenza di media entità; tiene in costante movimento le foglie e i rami più piccoli, sventolano le bandiere di piccole dimensioni.

I valori sono stati scelti perché rappresentativi della velocità media annua che caratterizza le condizioni atmosferiche rispettivamente delle zone pianeggianti di tutto il Nord Italia nel primo caso e le zone costiere del Centro Italia, nonché l'entroterra delle Isole e del Sud, nel secondo caso [26].

A partire da queste velocità, è possibile stabilire la natura della turbolenza attraverso le classi di stabilità di Pasquill. Il metodo rappresenta uno dei procedimenti di classificazione più comuni e permette di esprimere le condizioni atmosferiche tramite sei classi, identificate con le lettere dell'alfabeto dalla A alla F. Alla classe di stabilità A corrispondono condizioni di estrema instabilità, mentre alla classe F corrisponde una forte stabilità. La classe intermedia D identifica le condizioni di neutralità.

⁹ La Scala di Beaufort fornisce una misurazione empirica della forza e dell'intensità del vento basata sull'osservazione degli effetti che il vento ha sull'ambiente e sul mare.

¹⁰ Le maniche a vento sono un particolare tipo di anemoscopio (strumento utilizzato per indicare l'eventuale presenza e direzione del vento); quando investite da flusso d'aria si gonfiano a seconda dell'intensità del vento. In caso di calma, non è possibile visualizzare alcun effetto.

Sono state condotte varie prove in condizioni diverse così da ottenere un ampio ventaglio di casistiche differenti. Sulla base di queste informazioni è possibile assegnare, grazie al metodo di classificazione di Pasquill, una classe di stabilità ad ogni scenario ipotizzato. Di seguito si riportano gli scenari di contorno considerati nelle diverse simulazioni:

nominativo	Caratteristiche	Classe di stabilità	Condizioni di stabilità
GIORNATA ESTIVA FORTEMENTE INSTABILE	giornata assolata estiva caratterizzata da radiazione solare intensa e presenza di vento debole (1 m/s).	A	condizioni estremamente instabili (VERY UNSTABLE)
NOTTE STABILE	nottata Caratterizzata da copertura nuvolosa media (< 50%) e vento debole (1 m/s).	F	condizioni leggermente stabili (STABLE)
GIORNATA INVERNALE INSTABILE	giornata soleggiata durante la stagione invernale caratterizzata da una radiazione solare debole con presenza di vento a 4 m/s.	C	condizioni leggermente instabili (UNSTABLE)
NOTTE CON CONDIZIONI AMB. NEUTRE	nottata caratterizzata da una fitta copertura ($\geq 50\%$) e presenza di vento a velocità 4 m/s.	D	condizioni neutre (NEUTRAL)
NOTTE STABILE CON VENTO	nottata caratterizzata da copertura nuvolosa media (< 50%) e vento a velocità 4 m/s.	E	condizioni leggermente stabili (STABLE)

Sulla base di quanto discusso, l'implementazione e l'elaborazione del *layer* atmosferico del vento in FDS è stata realizzata ricorrendo all'approccio secondo la teoria della similarità di *Monin-Obukhov*. Nel caso in esame, a partire dalla specifica classe di stabilità sopramenzionata, è stato possibile ricavare la lunghezza caratteristica L [m] di Obukhov relativa alla stabilità termica del *layer* atmosferico del vento. In particolare, i valori adottati nelle diverse simulazioni sono riportati in Tab. 4.3.

Tabella 4.3: Valori della lunghezza di Obukhov impiegati nelle simulazioni e relativi vincoli connessi alla specifica classe di stabilità atmosferica [29].

Classe di stabilità atmosferica	Molto instabile	Instabile	Neutra	Stabile	Molto stabile
Vincolo sulla lunghezza di Obukhov L	$-200 \leq L < 0$	$-500 \leq L < -200$	$ L > 500$	$200 < L \leq 500$	$0 < L \leq 200$
Valore raccomandato di L	-100	-350	10^6	350	100

Ai fini di una simulazione *LES* – *Large Eddy Simulation* come quella condotta mediante FDS, l’aspetto fondamentale legato ad una corretta scelta del parametro L è legato alle relative fluttuazioni sul campo di moto riscontrabili sotto una certa classe di stabilità. Dal punto di vista numerico tale aspetto è determinante soprattutto per quanto riguarda la capacità del codice di calcolo e degli schemi numerici di approssimare tali dinamiche nel dominio di studio. Di fatto, in una classe atmosferica instabile, i meccanismi sono fortemente governati dal *mixing* turbolento che, al contrario, è pressoché soppresso in condizioni di stabilità atmosferica. Per ulteriori dettagli sulle strategie di calcolo numerico utilizzate per aggredire questo problema, si rimanda alla guida tecnica di FDS. [36]

Nella definizione del campo di moto del vento, in aggiunta a tali parametri, ne sono stati inseriti anche ulteriori riguardanti rispettivamente velocità media del vento e direzione dominante. In particolare, la velocità è stata imposta mediante *namelist*:

```
&WIND SPEED=5, DIRECTION=225
```

a descrivere, ad esempio, un campo di moto del vento caratterizzato da una velocità media di 5 m/s (valutata a 2 m dal suolo) e direzione dominante Sud-Ovest secondo il riferimento interno di FDS.

Più in dettaglio, le seguenti istruzioni inizializzano un campo di moto del vento con velocità media 1 m/s misurata a 10 m dal suolo in classe di stabilità A (molto instabile) con rugosità aerodinamica pari a 1:

```
&WIND L=-100.0,
      DIRECTION=270,
      SPEED=1.0
      Z_0=1.0, Z_REF=10.0 /
```

Un altro parametro fondamentale infatti per la corretta caratterizzazione del dominio alla luce delle condizioni atmosferiche è anche quello relativo alla rugosità del suolo. In una simulazione di tipo *LES*, essa viene intesa come rugosità aerodinamica z_0 [m] che, sulla base della

classificazione della tipologia di suolo presente nel dominio, può assumere valori nel range 10^{-4} – 10^0 [25]. I valori di rugosità utilizzati nelle diverse simulazioni hanno base nell'approccio di Davenport-Wieringa.

4.1.5 Modellazione della reazione di combustione

La caratterizzazione del termine sorgente per quanto concerne il fenomeno della combustione rappresenta un punto cruciale per la corretta riuscita dell'intera simulazione.

Nell'ambiente di calcolo FDS essa viene generalmente affidata alla *namelist &REAC* e alle relative principali sottocategorie che consentono di definire alcuni aspetti del fenomeno della combustione come riportato in Tab. 4.y.

Tabella 4.y: Modellazione del fenomeno della combustione di matrici plastiche: namelist &REAC e relativi parametri utilizzati.

&REAC namelist		
Modellazione della combustione di matrici plastiche		
Parametro	Comando	Note
Combustibile	FUEL	Stringa di caratteri per la definizione del materiale combustibile
Composto chimico	FORMULA	Stringa di caratteri per la definizione della formula chimica bruta del composto nel caso di utilizzo di un approccio <i>Simple Chemistry</i> in FDS
Rese nei prodotti di combustione	SPECIES_YIELD	Definizione delle rese di combustione a specifici prodotti di combustione (CO, H ₂ O, CO ₂ , HCl, ...)

Nella definizione della combustione in FDS è possibile adottare un duplice approccio, declinato rispettivamente in *simple chemistry approach* and *finite rate combustion*. Mentre il primo caso contempla una reazione di combustione estremamente veloce, ovvero controllata dalla miscelazione tra combustibile e comburente (*mixture fraction controlled*), il secondo ingloba una velocità finita di reazione derivante dal rispettivo complesso schema cinetico. Quest'ultimo approccio, nella pratica antincendio e di *Fire Safety Engineering*, è di utilizzo non pratico dal momento che richiede una *mesh* estremamente fine e incompatibile con le scale di studio della disciplina. A maggior ragione nel dominio di studio in esame, dove le dimensioni sono dell'ordine delle centinaia di metri e un calcolo secondo *finite rate combustion* non sarebbe possibile con la potenza di calcolo disponibile.

Per la modellazione della combustione nello studio in esame è stato dunque fatto riferimento all'approccio *simple chemistry* ovvero ad una combustione di tipo *mixing-controlled*.

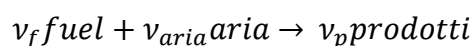
Dal punto di vista pratico, la combustione della matrice di rifiuto è stata innanzitutto definita dal punto di vista chimico. Le relative quantità dei diversi contributi di specie atomiche, basati sulla formula bruta, sono state dunque state assegnate nello specifico caso a PE, PP, PS e PVC. Le formule brute sono dunque state basate sulla chimica dei rispettivi monomeri ovvero rispettivamente $(C_2H_4)_n$, $(C_3H_6)_n$, $(C_8H_8)_n$, $(C_2H_3Cl)_n$. Come verrà spiegato oltre, nel caso del polivinilcloruro PVC è stato adottato un approccio specifico per la definizione della chimica dal momento che, a differenza dei monomeri contenenti solo C e H, la presenza di cloro richiede una manipolazione modellistica differenziata.

In aggiunta all'aspetto chimico, sono stati inseriti anche i dati relativi all'entalpia di combustione ovvero all'energia per volume rilasciata dalla reazione di combustione in fase gassosa. I dati utilizzati sono riportati in Tabella 4.4 [18.e, 25].

Tabella 4.4: valori del calore di combustione utilizzati nelle simulazioni per polietilene, polipropilene, polistirene [25] e polivinilcloruro [18.e]

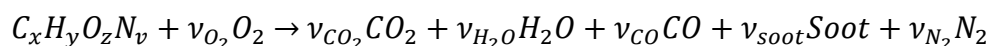
	PE	PP	PS	PVC
Calore di combustione [kJ/kg]	43400	42600	35800	16400

Muovendo alla fase gassosa del sistema, la stechiometria della reazione di combustione è stata specificata sempre mediante la *namelist &REAC* e, dato l'approccio *simple chemistry*, la tipica reazione avrà la seguente forma:



ad illustrare come una certa quantità di combustibile si misceli con l'aria a dare dei prodotti di reazione.

In particolare, nel caso generale di combustibili del tipo $C_xH_yO_zN_v$ si avrà [24]:



ovvero nello studio in esame, dalla combustione in fase gassosa della matrice si assume che le specie chimiche prodotte siano CO_2 , CO , H_2O , *soot* ovvero fuliggine ed eventuale N_2 . Si sottolinea che, accompagnato al comburente della reazione ovvero all'ossigeno, vi sarà anche la quota parte di azoto presente nella miscela aria (79 % N_2 , 21 % O_2) trattandosi di una combustione in ambiente atmosferico. I coefficienti della reazione chimica di combustione sono stati calcolati da stechiometria sulla base della composizione del combustibile e mediante bilanciamento.

Pertanto, per ogni matrice utilizzata, è stato implementato un calcolo per la stima dei rispettivi coefficienti stechiometrici di reazione valutati come indicato di seguito:

$$v_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO}$$

$$v_S = \frac{W_F}{W_{soot}} y_{soot};$$

$$v_{CO_2} = x - v_{CO} - (1 - X_H)v_S ;$$

$$v_{H_2O} = \frac{y}{2} - \frac{X_H}{2} v_S;$$

$$v_{O_2} = v_{CO_2} + \frac{v_{CO}}{2} + \frac{v_{H_2O}}{2} - \frac{z}{2};$$

$$v_{N_2} = \frac{v}{2};$$

dove, W_F , W_{soot} rappresentano i pesi molecolari rispettivamente del combustibile e del *soot* e X_H rappresenta la frazione di atomi di idrogeno nel *soot* che da letteratura è stata assunta pari a 0.1 ovvero a dare una formula chimica bruta $C_{0.9}H_{0.1}$ [25].

In FDS, ad esempio, nel caso del polietilene PE sono state implementate le seguenti righe di comando:

```
&REAC ID='plastic',
      FUEL= 'POLYETHYLENE',
      HEAT_OF_COMBUSTION=43400,
      SPEC_ID_NU='POLYETHYLENE', 'AIR', 'PRODUCTS',
      NU=-1, -2.845431, 14.70653,
      CO_YIELD=0.024,
      SOOT_YIELD=0.060,
      SOOT_H_FRACTION=0.1
      REAC_ATOM_ERROR = 0.0001,
      REAC_MASS_ERROR=0.0001/
```

In aggiunta al calcolo stechiometrico, è stato implementato anche un procedimento di controllo dei bilanci di massa e atomici allo scopo di garantire una soglia di tolleranza pari a 0.0001, resa nel codice con le istruzioni $REAC_ATOM_ERROR=0.0001, REAC_MASS_ERROR=0.0001$.

Come evidente dalle precedenti righe di comando, la modellazione della combustione ha previsto anche l'inserimento di parametri connessi alle rese di combustione verso specifici prodotti inclusi nella stechiometria della reazione.

In particolare, sono state assegnate le rese del combustibile a CO e *soot* ovvero rispettivamente la frazione di massa di combustibile convertito in monossido di carbonio (CO_YIELD) e particelle di fuliggine (CO_SOOT). In FDS tali valori di standard sono pari a 0.

Considerata l'ampia disponibilità di ventilazione trattandosi di uno scenario in campo aperto, sono stati utilizzati i valori indicati in Tab 4.5.

Tabella 4.5: Rese di combustione a CO (y_{CO}) e soot (y_{soot}). Incendio ben ventilato [18.f].

	PE	PP	PS	PVC
y_{CO}	0.024	0.024	0.060	0.063
y_{soot}	0.060	0.059	0.164	0.172

I valori di rese di combustione sono assunti costanti nel corso della simulazione anche considerato il fatto che, a scenario avviato, non si ravvedono condizioni tali per cui il livello di ventilazione subisca particolari modifiche. Ciò a differenza di un incendio in ambiente confinato dove, ad esempio, tali valori sono differenti in una condizione di *pre-* e *post-flashover*.

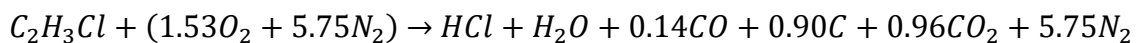
4.1.7 Combustione del polivinilcloruro (PVC)

Nel presente lavoro la combustione del polimero clorurato PVC ha richiesto un'implementazione particolare dal momento che in FDS è possibile utilizzare e dunque applicare parametri secondo approccio *simple chemistry* solo per molecole complesse che contengono al più atomi C, H, N, O.

Nel caso dunque del PVC, approssimabile come struttura monomerica alla formula bruta C_2H_3Cl , è necessario ricorrere ad un approccio chimico più complesso.

In questo studio, la chimica della combustione del PVC è stata assunta *single-step* nel senso che il cloro nel combustibile viene interamente convertito in acido cloridrico (HCl). In tal modo, la definizione in FDS diventa più agevole potendo definire anche delle rese a CO e *soot* secondo lo schema discusso precedentemente. Tale ipotesi ben può adattarsi al caso in studio (SFPE Handbook).

Secondo tale ipotesi dunque, i coefficienti stechiometrici della reazione di combustione del PVC sono stati ricavati da un equilibrio atomico a dare:



Nella reazione chimica, la miscela $(1.53O_2 + 5.75N_2)$ deriva dalla stechiometria della miscela comburente-inerte necessario per la combustione di 1 mole di PVC.

La specificità di questo combustibile, inoltre, è connessa alla necessità di definirne anche ulteriori proprietà dal momento che non risulta tra i combustibili standard del codice di calcolo. A riguardo, è stata utilizzata una linea &SPEC nella quale, anche in ragione della necessità di ridurre le risorse richieste al calcolo, sono state definite delle specie aggregate. Per ciascuna di esse è stata dunque definita la relativa frazione nei prodotti di combustione secondo la stechiometria considerata. Le righe di comando utilizzate in FDS sono riportate di seguito.

```
&SPEC ID = 'PVC' ,
      FORMULA = 'C2H3Cl' ,
      ENTHALPY_OF_FORMATION = 297.492 /

&SPEC ID = 'OXYGEN' ,           LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'NITROGEN' ,        LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'HYDROGEN CHLORIDE' , LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'WATER VAPOR' ,      LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON MONOXIDE' ,  LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE' ,   LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /
&SPEC ID = 'SOOT' , FORMULA='C' , LUMPED_COMPONENT_ONLY = .TRUE. /

&SPEC ID = 'AIR' ,
      SPEC_ID = 'OXYGEN' , 'NITROGEN' ,
      VOLUME_FRACTION = 1.53 , 5.76 ,
      BACKGROUND = .TRUE. /

&SPEC ID = 'PRODUCTS' ,
      SPEC_ID = 'HYDROGEN CHLORIDE' ,
              'WATER VAPOR' ,
              'CARBON MONOXIDE' ,
              'CARBON DIOXIDE' ,
              'SOOT' , 'NITROGEN' ,
      VOLUME_FRACTION = 1.0 , 1.0 , 0.14 , 0.96 , 0.90 , 5.76 /
```

Con riferimento al codice, si nota come la miscela che rappresenta i prodotti sia costituita da acido cloridrico, vapore di acqua, ossido di carbonio, anidride carbonica, *soot* e azoto. La sua composizione volumetrica è rispettosa della stechiometria della reazione in fase vapore ed è stata valutata nell'ipotesi di miscela ideale di gas.

A completare la definizione della combustione del PVC è stato inserito anche il valore dell'entalpia di formazione a rappresentare il calore di formazione della fase gassosa della specie considerata [25].

4.1.6 Esecuzione della simulazione e tempo di calcolo

Trattandosi di simulazioni di tipo *LES*, il tempo di calcolo richiesto potrebbe risultare proibitivo data la necessità di una risoluzione numerica di un grande numero di equazioni legate, da un lato alla complessità del fenomeno, e dall'altro al numero di celle della griglia di calcolo.

Per disporre di risultati interpretabili e in tempi ragionevoli, è stato deciso di simulare uno scenario della durata di 300 s anche dal momento che, *topic* di questo lavoro, è l'implementazione e lo studio dei termini sorgente connessi alla combustione di matrici plastiche.

Relativamente a questo aspetto e come indicato nel par. 4.1.5, è stato fatto uso ove opportuno del comando `LUMPED_COMPONENT_ONLY`. In tal modo, ogni specie chimica che non deve avere un'equazione esplicita di trasporto (di materia, quantità di moto ed energia) è stata definita mediante questo comando, allo scopo di non appesantire inutilmente il calcolo dello scenario.

4.2 Selezione degli output da analizzare

Una particolarità di FDS consiste nel fatto che, pur conducendo i calcoli su ogni cella del dominio, al termine dell'elaborazione il programma restituisce come risultato solo i dati che sono stati esplicitamente richiesti nella fase di input. Per cui, è necessario già nella fase preparatoria stabilire quali siano le grandezze caratteristiche di interesse per eventuali elaborazioni.

In questo lavoro è stato scelto di disporre in *output* delle seguenti proprietà in specifici punti del dominio:

- temperatura
- potenza rilasciata per unità di volume (HRRPUV)
- frazioni massive dei prodotti di combustione

Per le modalità con le quali lavora il codice di calcolo, è stato possibile inoltre utilizzare due tipologie di controllo diverse.

In alcuni casi è stato utilizzato un dispositivo di controllo puntuale per la misurazione della temperatura (in modalità dunque di *termocoppia*). In questo modo sono stati individuati vari punti e per ognuno di questi il programma ha registrato le fluttuazioni termiche nel corso della simulazione, memorizzandoli.

Il comando utilizzato è stato definito dunque come `QUANTITY= 'THERMOCOUPLE'` ovvero il relativo valore in *output* corrisponde alla temperatura misurata da una termocoppia che, in questo studio, è assunta di tipo K. In tal modo si è cercato di riprodurre l'eventualità di un

monitoraggio della temperatura mediante appositi apparecchi, comunemente utilizzati in sede di indagini sperimentali.

I punti di osservazione sono stati selezionati a diverse altezze e disposti sia nei pressi del fuoco che distante, ovvero in vicinanza dei confini del dominio. Si riportano di seguito i prospetti con la disposizione delle sonde (da Fig. 4.3 a Fig. 4.12). La vista è quella del dominio dall'alto, sezionato con piani perpendicolari all'asse Z.

In Fig. 4.3 si riportano i dispositivi posti alla quota minore, pari a 1.5m (Serie S). Come è possibile notare, la maggior parte delle sonde sono concentrate attorno al fuoco, nell'ipotesi che lì si registino le temperature maggiori. Della restante parte, le sonde sono sparse per tutta la lunghezza del dominio, in direzione X in asse con il fuoco. Le sonde dalla S-1 alla S-4, ad esempio sono poste rispettivamente alla distanza di 5m, 10m, 15m e 20m. Le sonde poste lateralmente ma in linea con il fuoco (S-sx e S-dx) sono poste a 5m di distanza.

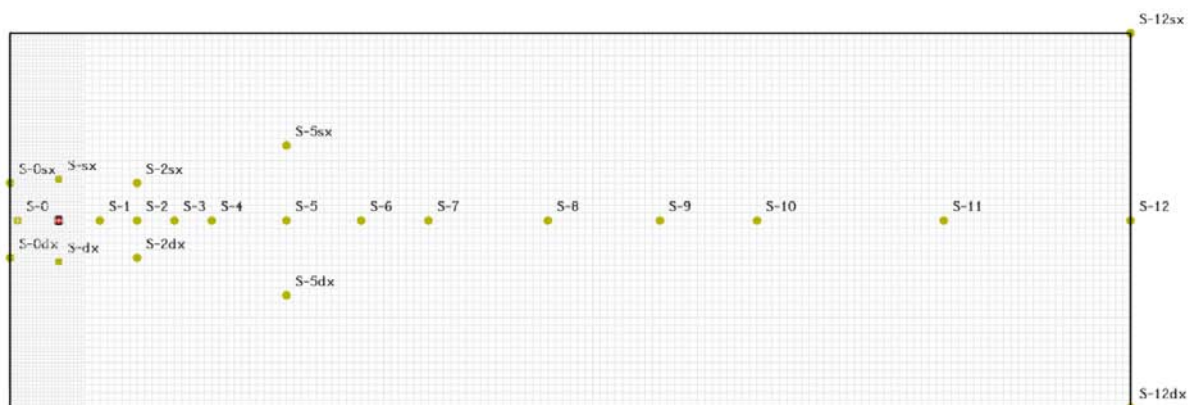


Figura 4.3: posizionamento delle sonde a quota 1.5m (Serie S)

La Fig. 4.4 rappresenta le sonde poste a quota 2m (Serie D). Si è scelto di metterne un numero contenuto perché interposte tra le serie più fitte a quota 1.5m e 3m. Le prime 5 sonde (dalla D-1 alla D-5) sono poste rispettivamente alla distanza 5m, 10m, 15m, 20m e 30m.

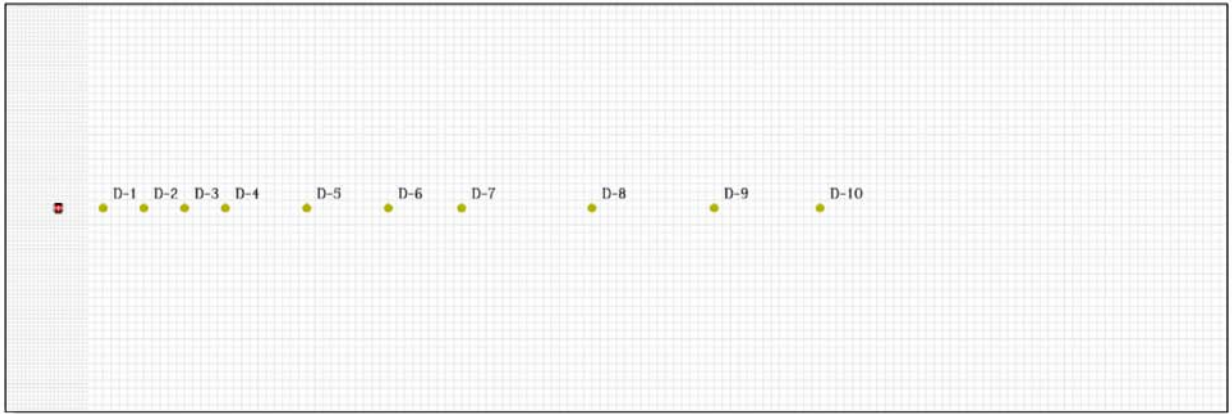


Figura 4.4: posizionamento delle sonde a quota 2m (Serie D)

La Fig. 4.5 illustra la disposizione delle sonde poste ad altezza 3m (Serie T). Valgono le stesse considerazioni fatte per la Serie S. Le sonde dalla T-1 alla T-5 sono posizionate in corrispondenza delle rispettive D ed S. I dispositivi posizionati fuori asse, si distanziano dal centro di 5m (T-sx e T-dx), di 10m (T-1sx, T-1dx, T-5sx e T-5dx) e 15m (T-7sx e T-7dx).

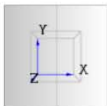
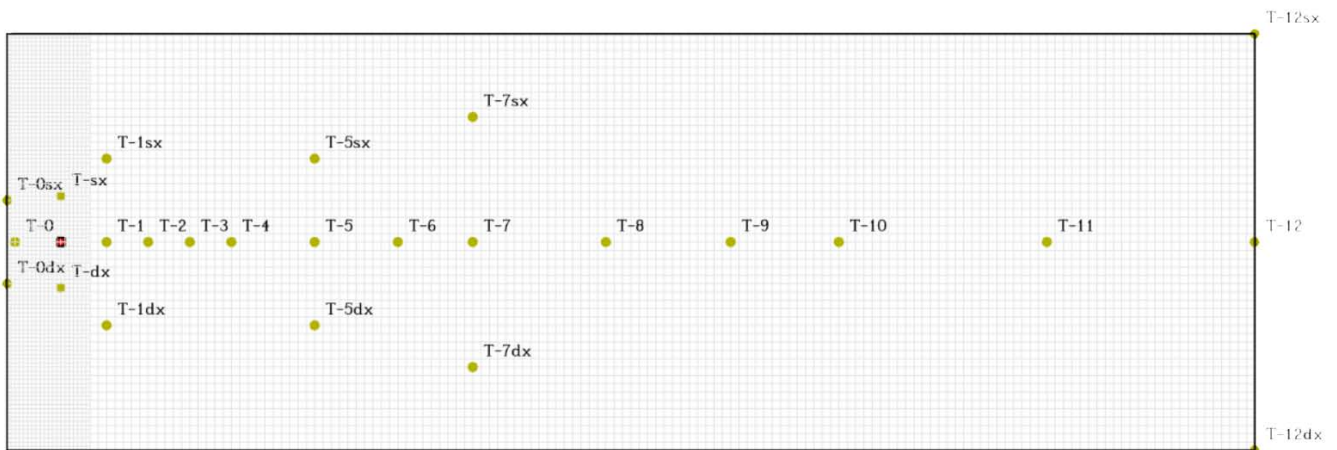


Figura 4.5: posizionamento delle sonde a quota 3m (Serie T)

Segue quindi la disposizione delle sonde sul piano a quota 5.0m (Serie C). Anche qui le prime sonde sono perfettamente sovrapposte alle analoghe posizionate a quote inferiori. Le sonde poste lateralmente distano dall'asse centrale di 10m (C-sx, C-dx), 5m (C-1sx, C-1dx) e 9m (C-5sx, C-5dx).

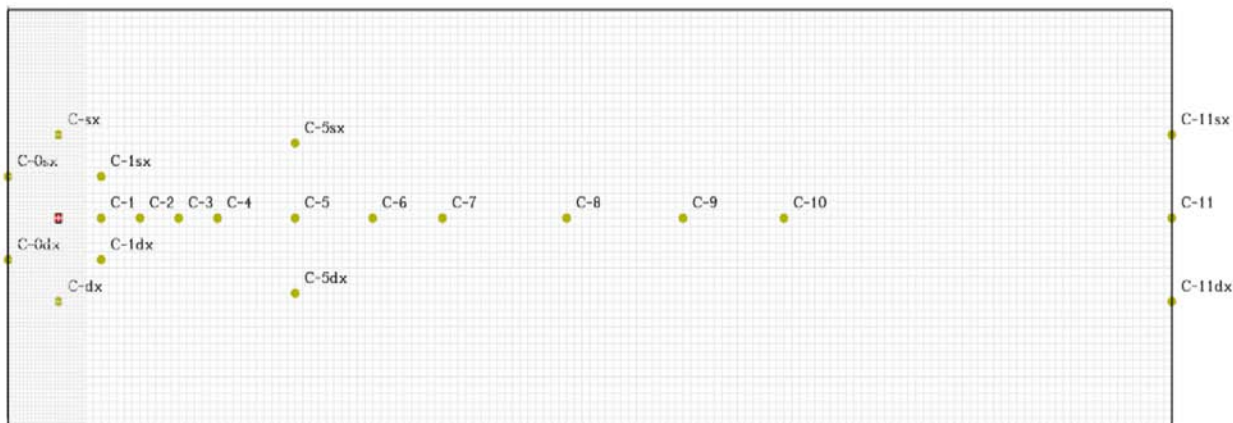


Figura 4.6: posizionamento delle sonde a quota 5m (Serie C)

La Fig. 4.7 rappresenta le sonde poste a 10m (Serie H). Da questa altezza si è scelto di spostare le sonde, allungando e allargando la disposizione, in considerazione del fatto che il fumo tende a disperdersi salendo verso l'alto. Per le sonde dalla H-1 alla H-5 valgono le considerazioni analoghe per le precedenti. Inoltre, H-4sx e H-4dx si distanziano dall'asse del dominio di 10m; le laterali di H-7, H-10 e H-11 invece si staccano a destra e sinistra di 15m.

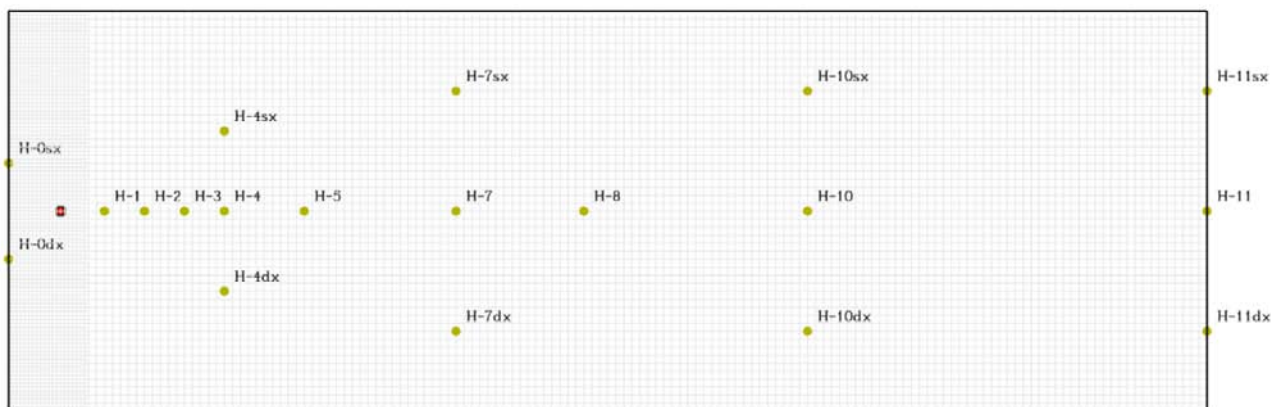


Figura 4.7: posizionamento delle sonde a quota 10m (Serie H)

Infine, la Fig. 4.8 riporta l'ultima sezione con la disposizione delle sonde a 20m di altezza (Serie V). Anche qui i dispositivi di controllo puntuali sono stati posizionati lungo tutta l'estensione del dominio e sparsi in modo da coprire il più possibile tutta l'area.

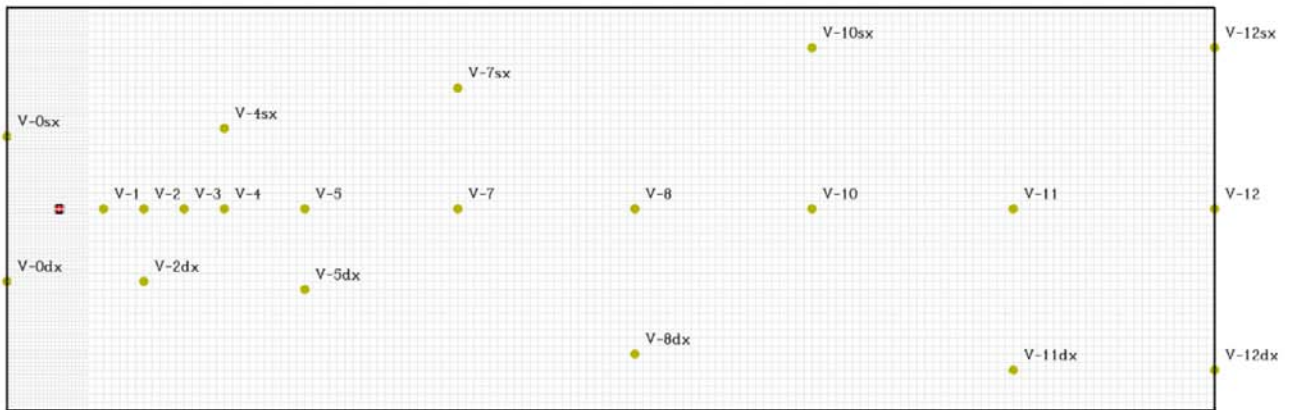


Figura 4.8: posizionamento delle sonde a quota 20m (Serie V)

I risultati ottenuti dai dispositivi di controllo puntiformi vengono registrati su file con estensione '.csv', elaborabili in ambiente excel. Ad ogni sonda corrisponde una colonna di valori, avente tante righe quanti sono gli istanti di tempo per i quali è fornito un output.

Il secondo metodo utilizzato per la restituzione dei risultati ha previsto l'uso di piani di controllo mediante pertanto la *namelist* &SLCF QUANTITY=' '. In questo caso, vengono registrati i valori della quantità richiesta su una sezione del dominio, al variare del tempo. Sono stati ottenuti così i valori di: temperatura, HRRPUV, frazioni massive di monossido di carbonio, di vapore acqueo, di anidride carbonica e di particolato.

Tutte queste quantità sono state registrate su piani perpendicolari all'asse Z e posizionati a quota 1.5m, 2.0m, 3.0m, 5.0m, 10.0m, 20.0m e a 40m. (§Fig. 4.9)

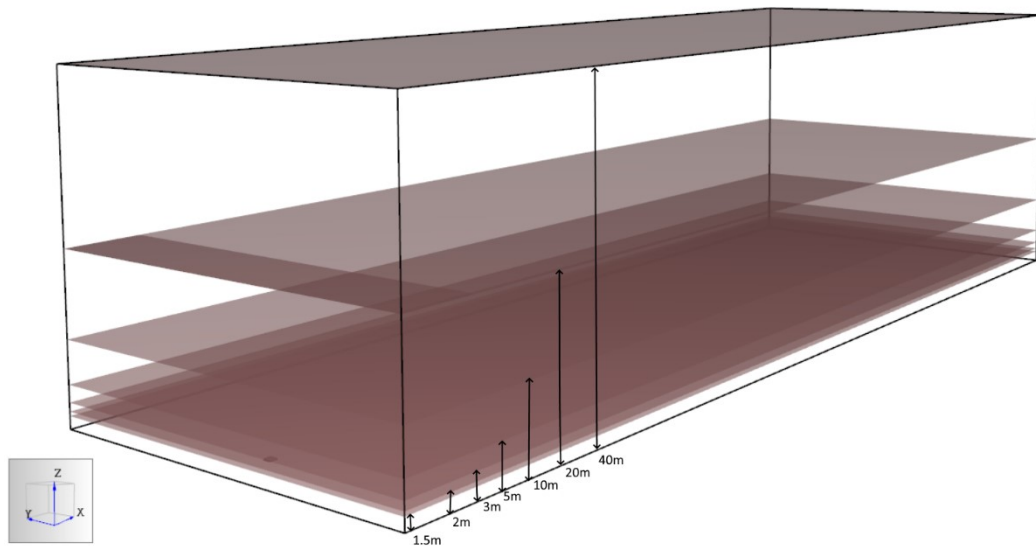


Figura 4.9: piani di controllo posizionati a diverse quote perpendicolarmente all'asse Z

Le stesse quantità sono state inoltre registrate nei piani perpendicolari all'asse X, all'origine del dominio ($x=0m$) e poi a 6.5 m, in corrispondenza del fuoco. Altri piani sono stati posti a 10 m, 12 m, 17 m, 27 m che equivale rispettivamente a fare misurazioni a distanza dal fuoco pari a 3 m, 5 m, 10m e 20m. Gli altri piani sono stati posizionati a 50 m, 100 m e 150 m.

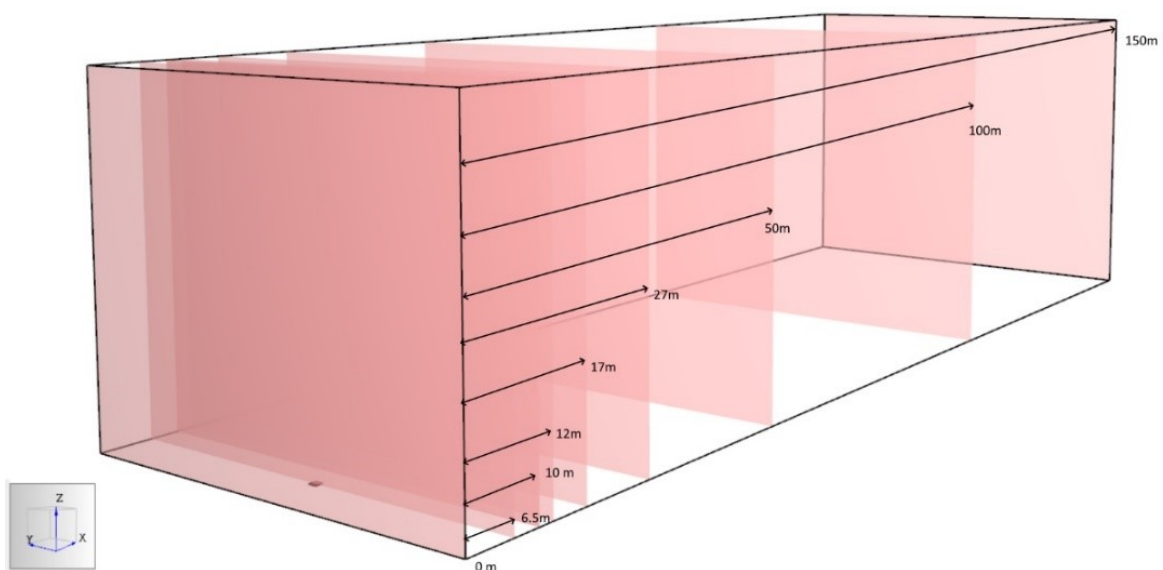


Figura 4.10: piani di controllo posizionati a diverse distanze perpendicolarmente all'asse X

Infine, è stato posizionato anche un piano lungo la direzione prevalente del dominio, in asse con il fuoco ($y=25\text{m}$) che misuri tutte le quantità suddette. Parallelamente a questo, sono stati posizionati altri 4 piani, due a destra e due a sinistra, posti alle distanze a 10m e 20m, che misurino la temperatura.

(§Fig. 4.11 e §Fig. 4.12)

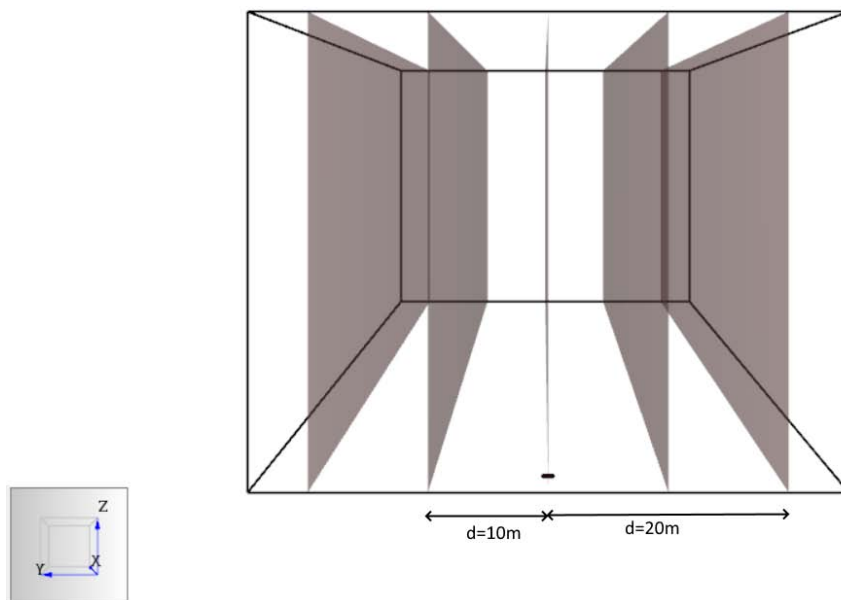


Figura 4.11: piani di controllo posizionati a diverse distanze perpendicolarmente all'asse Y

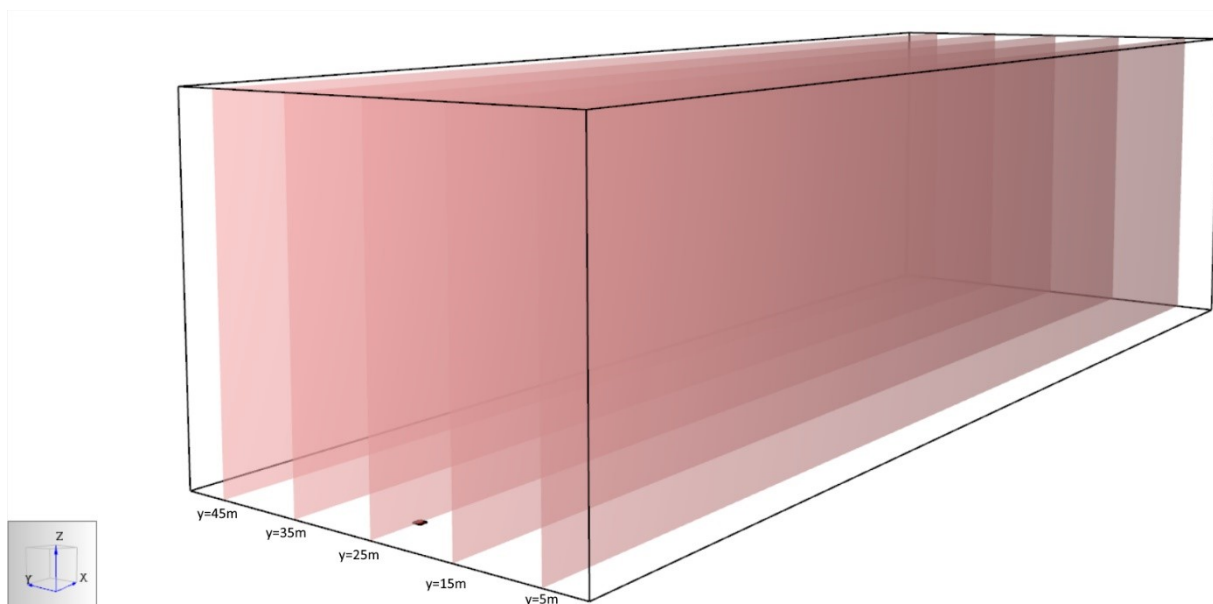


Figura 4.12: piani di controllo posizionati a diverse distanze perpendicolarmente all'asse Y

Capitolo 5

Analisi dei risultati e discussione

Nel presente capitolo vengono analizzati i risultati ottenuti dalle simulazioni di combustione effettuate su matrici plastiche selezionate.

5.1 Le simulazioni: tipologia, modalità e parametri usati

I materiali impiegati nello svolgimento delle simulazioni sono: polietilene, polipropilene, polistirene e polivinilcloruro. Trattasi di matrici polimeriche comunemente presenti in siti di deposito e stoccaggio, per le quali sono stati forniti degli approfondimenti accurati nei capitoli precedenti.

Per la conduzione delle prove, ogni materiale è stato considerato singolarmente, come unico componente di una ipotetica frazione merceologia omogenea.

Qui di seguito, in Tab. 5.1, si riportano sinteticamente i valori utilizzati nelle simulazioni per ogni singolo materiale impiegato. Per qualsiasi specifica sui dati si rimanda ai contenuti del §Cap 4.

Tab. 5.1: valori dei parametri chimico-fisici impiegati nelle simulazioni

	PE	PP	PS	PVC
densità [kg/m ³]	930	960	1050	1950
calore specifico [kJ/(kg K)]	1.55	2.16	1.25	1.38
conducibilità termica [W/mK]	0.34	0.20	0.14	0.26
HRR [KW]	2735	2421	1555	191
calore di combustione [kJ/kg]	43400	42600	35800	16400
y_{co}	0.024	0.024	0.060	0.063
y_{soot}	0.060	0.059	0.164	0.172

Per ogni materiale sono state condotte varie prove, considerando condizioni ambientali differenti, così da poter ampliare il ventaglio delle casistiche ed eventualmente riuscire ad individuare quali siano le situazioni che presentano maggiore criticità. Di seguito, la Tab. 5.2 riporta le caratteristiche principali degli scenari ambientali ipotizzati.

Tab. 5.2: caratteristiche ambientali degli scenari di incendio ipotizzati

Caratteristiche	nominativo	Condizioni di stabilità
giornata assolata estiva caratterizzata da radiazione solare intensa e presenza di vento debole (1 m/s).	GIORNATA ESTIVA FORTEMENTE INSTABILE	condizioni estremamente instabili (VERY UNSTABLE)
nottata caratterizzata da copertura nuvolosa media (< 50%) e vento debole (1 m/s).	NOTTE STABILE	condizioni leggermente stabili (STABLE)
giornata soleggiata durante la stagione invernale caratterizzata da una radiazione solare debole con presenza di vento a 4 m/s.	GIORNATA INVERNALE INSTABILE	condizioni leggermente instabili (UNSTABLE)
nottata caratterizzata da una fitta copertura (≥ 50%) e presenza di vento a velocità 4 m/s.	NOTTE CON CONDIZIONI AMB. NEUTRE	condizioni neutre (NEUTRAL)
nottata caratterizzata da copertura nuvolosa media (< 50%) e vento a velocità 4 m/s.	NOTTE STABILE CON VENTO	condizioni leggermente stabili (STABLE)

Tutte le simulazioni sono state condotte in un dominio di dimensioni di 150m x 50m x 40m. Il corpo soggetto a combustione è stato rappresentato, per le ragioni già viste al Cap. 4, come una superficie piana delle dimensioni di 1m². Solo in due casi (rif. a matrice polistirene) sono state aumentate le dimensioni della superficie di combustione e portate rispettivamente fino alla lunghezza di 5m x 5m e 10m x 10m.

È stato richiesto al calcolatore di restituire una predizione degli effetti per un arco di tempo pari a 300 secondi.

Infine, le simulazioni sono state impostate in modo da poter ottenere informazioni in merito a evoluzione dei fumi, concentrazione dei prodotti di combustione e andamento termico della reazione.

A tal proposito si specifica che i risultati verranno esaminati di seguito per tipologia di materiale, affrontando un'analisi qualitativa dell'evoluzione del pennacchio dei fumi e indagando gli andamenti delle concentrazioni dei prodotti di combustione quali anidride carbonica, monossido di carbonio, particolato e, nel caso del PVC, anche acido cloridrico. Seguirà inoltre un confronto riguardo gli aspetti termici della reazione, come ad esempio temperatura dei gas di combustione e irraggiamento termico.

5.2 Prove eseguite con polietilene

Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle prove condotte utilizzando il polietilene come matrice omogenea soggetta a combustione.

5.2.1 Analisi qualitativa dell'evoluzione del pennacchio dei fumi

Osservando la formazione e l'evoluzione del pennacchio dei fumi che si genera dalla zona di combustione, è possibile rilevare delle configurazioni analoghe, anche tra prove effettuate in condizioni ambientali differenti.

Lo scenario che si instaura nel caso di simulazione effettuata in condizioni di forte instabilità e vento debole è molto simile a quello che si verifica in condizioni di leggera stabilità con presenza di vento debole. Il pennacchio di fumo si erge verso il cielo, senza subire particolari deviazioni, salvo poi ricadere per gravità dentro il dominio già nei primi minuti di simulazione. Si riporta di seguito, nelle figure dalla Fig. 5.1 alla 5.4, l'evoluzione della dispersione dei fumi a 60 secondi e 300 secondi, nei due casi sopracitati.



Figura 5.1: evoluzione del pennacchio dei fumi, a $t=60s$, nel caso di combustione del polietilene in condizioni di forte instabilità e presenza di vento debole ($v=1m/s$)



Figura 5.2: evoluzione del pennacchio dei fumi, a $t=300s$, nel caso di combustione del polietilene in condizioni di forte instabilità e presenza di vento debole ($v=1m/s$)



Figura 5.3: evoluzione del pennacchio dei fumi, a $t=60s$, nel caso di combustione del polietilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e presenza di vento debole ($v=1m/s$)



Figura 5.4: evoluzione del pennacchio dei fumi, a $t=300s$, nel caso di combustione del polietilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e presenza di vento debole

In modo analogo, le restanti prove presentano una simile evoluzione dei fumi di combustione nel dominio. In particolare, si fa riferimento agli scenari di combustione caratterizzati rispettivamente da leggera instabilità, neutralità e leggera stabilità delle condizioni atmosferiche e presenza di vento forte, che spira alla velocità di 4m/s. Anche in questo caso, si propone di seguito nelle figure dalla Fig. 5.5 alla Fig. 5.10, un confronto tra la dispersione elaborata dal programma nelle diverse condizioni, all'istante di tempo t pari a 60 secondi e 300 secondi.



Figura 5.5: evoluzione del pennacchio dei fumi, a $t=60s$, nel caso di combustione del polietilene in condizioni di leggera instabilità atmosferica e presenza di vento forte ($v=4m/s$)



Figura 5.6: evoluzione del pennacchio dei fumi, a $t=300s$, nel caso di combustione del polietilene in condizioni di leggera instabilità atmosferica e presenza di vento forte ($v=4m/s$)



Figura 5.7: evoluzione del pennacchio dei fumi, a $t=60s$, nel caso di combustione del polietilene in condizioni neutre di stabilità atmosferica e presenza di vento forte ($v=4m/s$)



Figura 5.8: evoluzione del pennacchio dei fumi, a $t=300s$, nel caso di combustione del polietilene in condizioni neutre di stabilità atmosferica e presenza di vento forte ($v=4m/s$)



Figura 5.9: evoluzione del pennacchio dei fumi, a $t=60s$, nel caso di combustione del polietilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e presenza di vento forte ($v=4m/s$)



Figura 5.10: evoluzione del pennacchio dei fumi, a $t=60s$, nel caso di combustione del polietilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e presenza di vento forte ($v=4m/s$)

La colonna di fumo che si genera dalla combustione, non sale verticalmente come nei primi due casi, ma subisce una forte inclinazione. Inoltre, si assiste ad una intensa dispersione dei prodotti della combustione che vanno ad occupare tutto il volume del dominio. Viene facile ipotizzare che la forte dispersione non sia dovuta tanto alle condizioni atmosferiche quanto più alla miscelazione generata dalle correnti ventose.

5.2.2 Analisi dei prodotti di combustione

Si procede ora con l'analisi dei prodotti di combustione rinvenuti nel dominio.

In particolare, si indagano le concentrazioni di monossido di carbonio, particolato e anidride carbonica. Per ognuna di queste specie, si riporta di seguito una tabella di confronto, con i valori massimi riscontrati in corrispondenza del fuoco e a varie distanze dallo stesso.

Nel caso del particolato (*soot*) le misurazioni sono effettuate in corrispondenza del fuoco, e poi a 3m, 5m e 10m. Le caselle contrassegnate con “-” segnalano che il dato non è disponibile.

Tabella 5.3: concentrazioni massime di particolato in corrispondenza del fuoco e a varie distanze, generate durante la combustione di polietilene in differenti condizioni ambientali

CONCENTRAZIONI DI PARTICOLATO [g/kg]	distanza dal fuoco				
	0m	3m	5m	10m	
PE	giornata estiva fortemente instabile	0.29	0.058	-	-
	nottata stabile	0.23	0.067	-	-
	giornata invernale instabile	0.10	0.07	0.037	0.03
	combustione in condizioni ambientali neutre	0.07	0.064	0.032	0.02
	stabilità ambientale e presenza di vento forte	0.103	0.075	0.037	0.027

Si prendono quindi in considerazione

- il caso simulato in condizioni di forte instabilità e vento debole
- il caso di combustione in condizioni di leggera instabilità e vento forte.

Per entrambi, si riportano delle immagini per permettere il confronto delle distribuzioni di concentrazione di particolato in un dato punto dello spazio, al variare del tempo.

La figura 5.11 illustra l'evoluzione della concentrazione di particolato a 3m di distanza dal fuoco, rispettivamente agli istanti pari a 60, 180 e 300 secondi, per una combustione che avvenga nelle condizioni del primo caso.

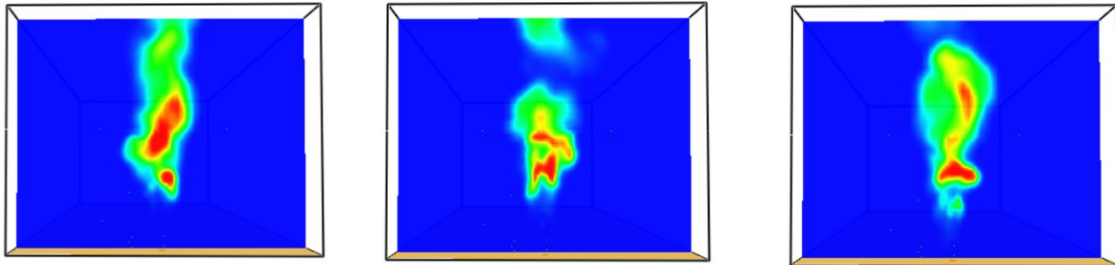


Fig. 5.11: andamento delle concentrazioni di particolato a 3m dal fuoco, rispettivamente a 60s, 180s e 300s dopo l'inizio della combustione di polietilene in condizioni di forte instabilità atmosferica e vento debole

In Fig. 5.11 la scala cromatica associa concentrazioni pari a 0.05278-0.05864 g/kg nelle zone rosse, circa pari a 0.04691 g/kg per le zone gialle, valori compresi tra 0.02346-0.04105 g/kg si associano alle zone verdi e valori inferiori a 0.01759g/kg per le zone blu-azzurre,

Si nota facilmente che le concentrazioni maggiori si riscontrano nella zona centrale del dominio.

Diversamente, nel secondo caso considerato (leggera instabilità atmosferica e vento a 4m/s) le concentrazioni maggiori di particolato si stabilizzano a quote molto inferiori. Anche qui si riporta un confronto delle configurazioni assunte dal piano di controllo posto a 3m, a 60, 180 e 300 secondi dall'inizio della combustione.

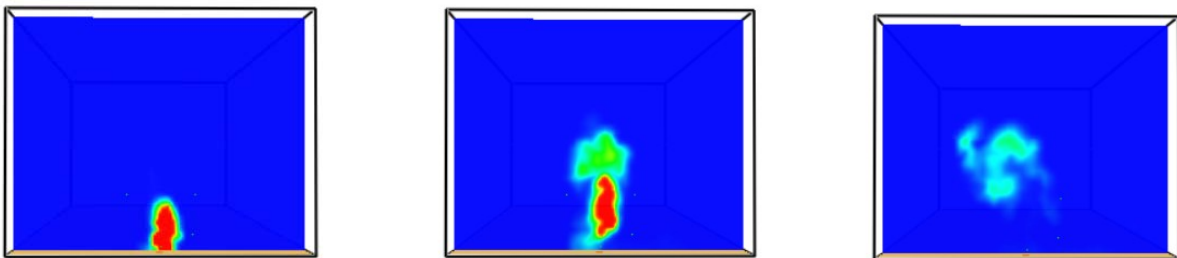


Fig. 5.12: andamento delle concentrazioni di particolato a 3m dal fuoco, rispettivamente a 60s, 180s e 300s dopo l'inizio della combustione di polietilene in condizioni di leggera instabilità atmosferica e vento a 4m/s

Le concentrazioni associate in questo caso variano tra 0.0654-0.0726 g/kg per le zone rosse, tra 0.0218-0.0508 g/kg per le zone verdi e assumono valori inferiori a 0.0145 g/kg per le zone blu.

In questo secondo caso, non solo le concentrazioni sono maggiori rispetto al precedente caso di combustione in condizioni di instabilità atmosferica e vento debole, ma si portano a quote talmente basse da poter vedere l'eventuale presenza di occupanti nello spazio in questione, con il rischio che questi ultimi siano direttamente investiti dai gas di combustione.

Tabella 5.4: concentrazioni massime di monossido di carbonio in corrispondenza del fuoco e a varie distanze, generate durante la combustione di polietilene in differenti condizioni ambientali

CONCENTRAZIONI DI CO [g/kg]	distanza dal fuoco		
	0m	3m	5m
giornata estiva fortemente instabile	0.1158	-	-
nottata stabile	0.093	0.026	-
giornata invernale instabile	0.042	0.029	0.015
PE combustione in condizioni ambientali neutre	0.028	0.026	0.013
stabilità ambientale e presenza di vento forte	0.041	0.030	-

Si prendono quindi in considerazione

- il caso simulato in condizioni di forte instabilità e vento debole (poiché presenta il valore di concentrazione maggiore di monossido di carbonio emesso durante la combustione)
- il caso di combustione in condizioni di leggera instabilità e vento forte (poiché presenta tendenzialmente le concentrazioni maggiori, non solo in corrispondenza del fuoco ma anche a valle dello stesso)

Per entrambi, si riportano una serie di immagini che permettano di effettuare un confronto fra le diverse distribuzioni di concentrazione di monossido di carbonio in un dato punto dello spazio, al variare del tempo.

La Fig. 5.13 presenta il confronto fra le diverse configurazioni registrate dal piano di controllo posto in corrispondenza del fuoco, agli istanti t pari a 60, 180 e 300s, nelle condizioni di forte instabilità e vento debole.

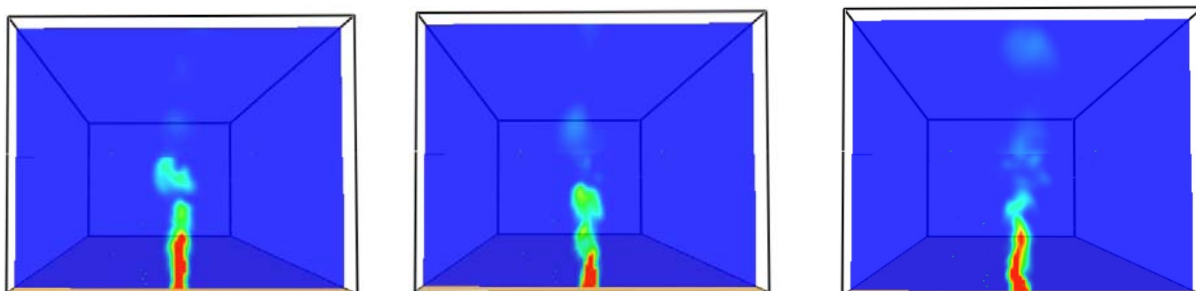


Fig. 5.13: andamento delle concentrazioni di monossido di carbonio in corrispondenza del fuoco, rispettivamente a 60s, 180s e 300s dopo l'inizio della combustione di polietilene in condizioni di forte instabilità atmosferica e vento a 1m/s

In questo caso alle zone rosse corrispondono valori di concentrazione compresi nell'intervallo 0.1042-0.1158 g/kg, alle zone verdi valori compresi fra 0.0347-0.08 g/kg e alle zone blu valori inferiori a 0.0232 g/kg.

Un confronto analogo viene riproposto in Fig. 5.14 per il caso di combustione in condizioni di leggera instabilità e vento forte.

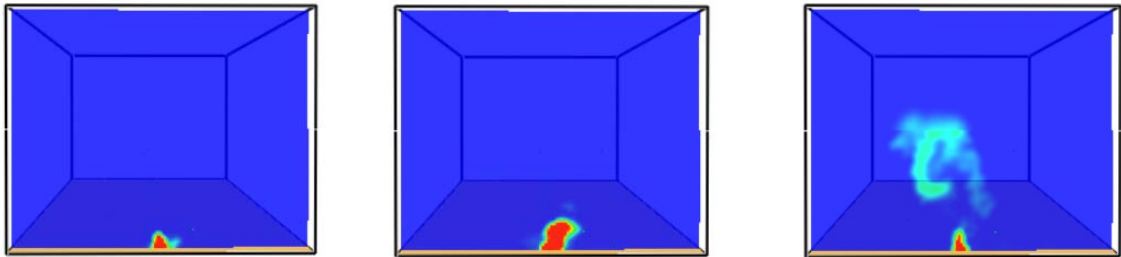


Fig. 5.14: andamento delle concentrazioni di monossido di carbonio in corrispondenza del fuoco, rispettivamente a 60s, 180s e 300s dopo l'inizio della combustione di polietilene in condizioni di leggera instabilità atmosferica e vento forte a 4m/s

Per completezza, relativamente a questo ultimo caso, si riporta un ulteriore confronto fra le diverse concentrazioni di monossido di carbonio registrate allo stesso istante t pari a 60 secondi, su piani di controllo a varie distanze. (Fig. 5.15- Fig. 5.17)

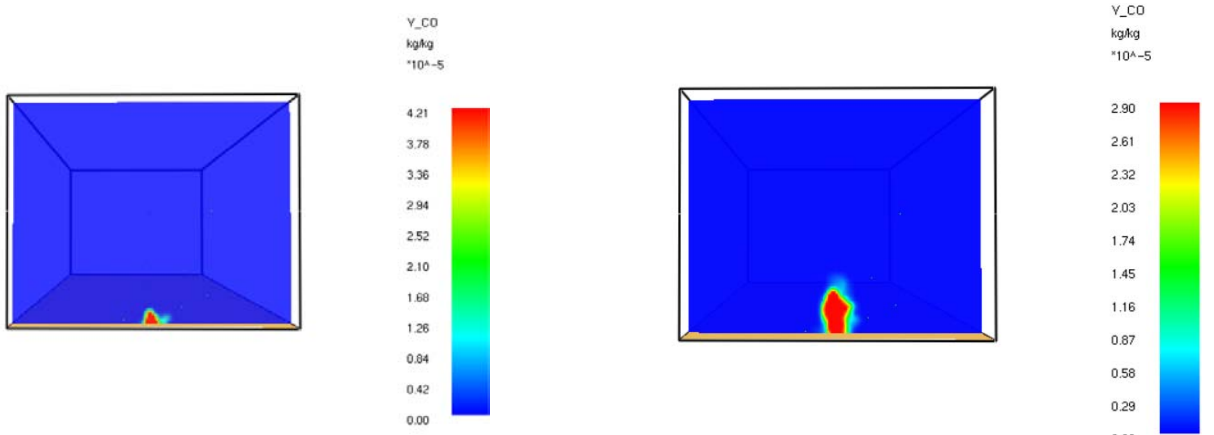


Fig. 5.15: distribuzione delle concentrazioni di monossido di carbonio in corrispondenza del fuoco, a 60s dopo l'inizio della combustione di polietilene in condizioni di leggera instabilità atmosferica e vento forte a 4m/s

Fig. 5.16: distribuzione delle concentrazioni di monossido di carbonio a 3m dal fuoco, a 60s dopo l'inizio della combustione di polietilene in condizioni di leggera instabilità atmosferica e vento forte a 4m/s

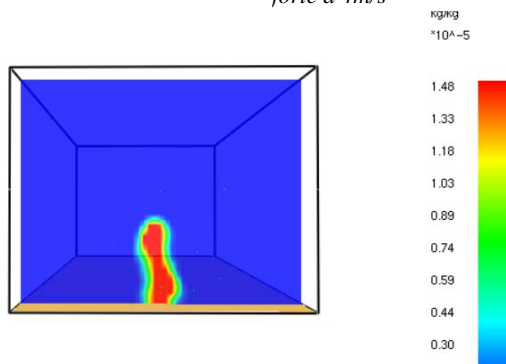


Fig. 5.17: distribuzione delle concentrazioni di monossido di carbonio a 5m dal fuoco, a 60s dopo l'inizio della combustione di polietilene in condizioni di leggera instabilità atmosferica e vento forte a 4m/s

Di seguito viene riportata una tabella che riassume i valori massimi di concentrazione di anidride carbonica, riscontrati nel dominio a varie distanze dal fuoco. (Tab. 5.4)

Tab 5.4: concentrazioni massime di CO₂ riscontrate nel dominio a varie distanze dal fuoco, durante la combustione del polietilene in condizioni ambientali diverse

CONCENTRAZIONI DI CO ₂ [g/kg]	distanza dal fuoco				
	5m	10m	20m	40m	
PE	giornata estiva fortemente instabile	1.73	1.0	0.45	0.23
	nottata stabile	1.78	1.05	0.5	0.24
	giornata invernale instabile	1.78	1.3	0.83	0.45
	combustione in condizioni ambientali neutre	1.54	1.2	0.79	0.42
	stabilità ambientale e presenza di vento forte	1.82	1.3	0.8	0.42

Nelle immagini Fig. 5.17 – Fig. 5.22, si propone un confronto fra le configurazioni di distribuzione dell’anidride carbonica nei casi di leggera stabilità con vento debole (immagini a sinistra) e leggera stabilità ambientale con presenza di vento forte (immagini a destra), a 5m dal fuoco, in diversi istanti della combustione.

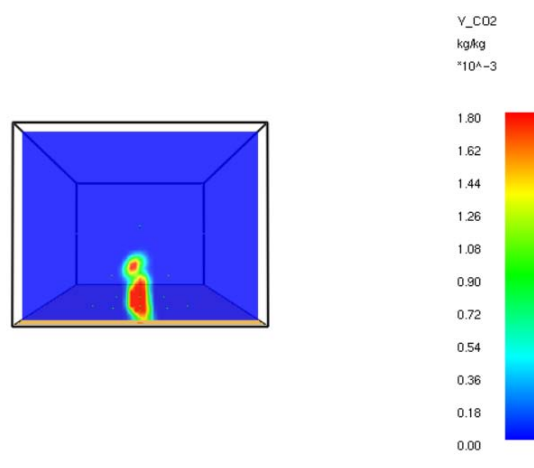
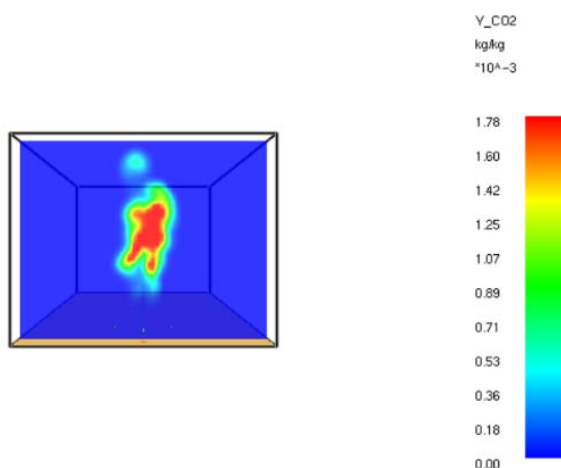


Fig. 5.17: distribuzione delle concentrazioni di anidride carbonica, sul piano di controllo a 5m dal fuoco, dopo 60 s dall’inizio della combustione di polietilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e vento debole ($v=1m/s$)

Fig. 5.18: distribuzione delle concentrazioni di anidride carbonica, sul piano di controllo a 5m dal fuoco, dopo 60 s dall’inizio della combustione di polietilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e vento forte ($v=4m/s$)

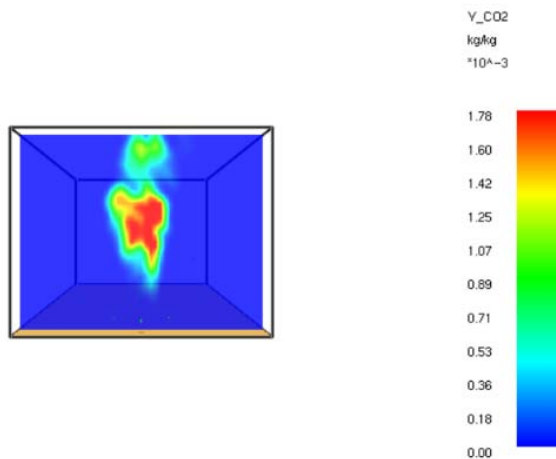


Fig. 5.19: distribuzione delle concentrazioni di anidride carbonica, sul piano di controllo a 5m dal fuoco, dopo 180 s dall'inizio della combustione di polietilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e vento debole ($v=1\text{m/s}$)

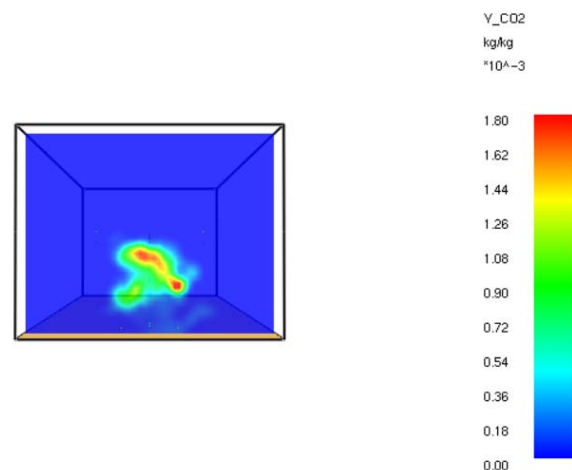


Fig. 5.20: distribuzione delle concentrazioni di anidride carbonica, sul piano di controllo a 5m dal fuoco, dopo 180 s dall'inizio della combustione di polietilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e vento forte ($v=4\text{m/s}$)

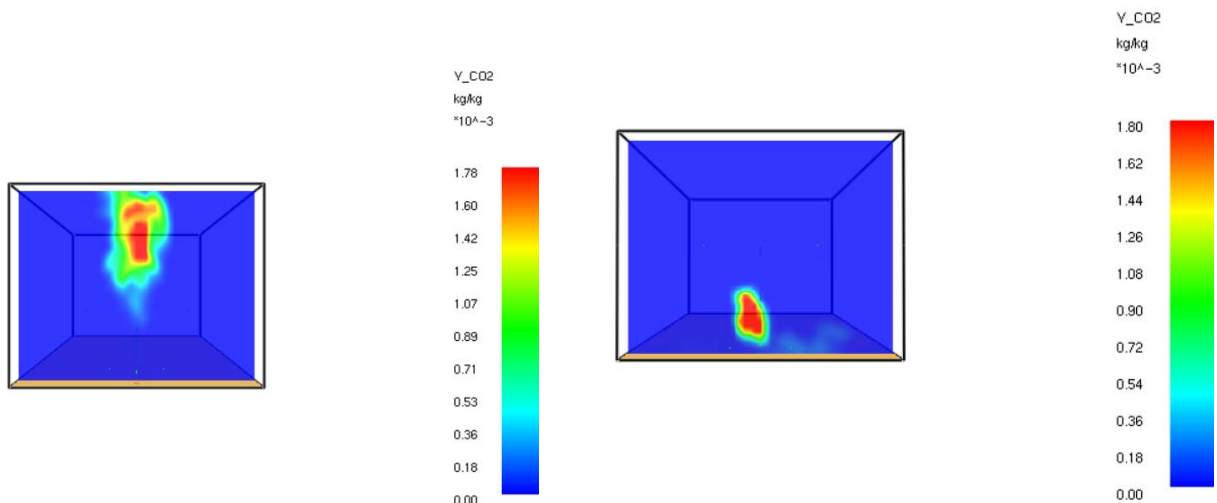


Fig. 5.21: distribuzione delle concentrazioni di anidride carbonica, sul piano di controllo a 5m dal fuoco, dopo 300 s dall'inizio della combustione di polietilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e vento debole ($v=1\text{m/s}$)

Fig. 5.22: distribuzione delle concentrazioni di anidride carbonica, sul piano di controllo a 5m dal fuoco, dopo 300 s dall'inizio della combustione di polietilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e vento forte ($v=4\text{m/s}$)

5.2.3 Analisi termica

Nella presente sezione si cerca di approfondire alcuni aspetti termici correlati alle prove di combustione.

Innanzitutto, si è indagato quale sia il comportamento termico dei gas di combustione che invadono il dominio. Per questo aspetto sono stati elaborati i dati rilevati dalle sonde puntiformi posizionate nel dominio. Anche in questo caso l'andamento riscontrato nelle prove effettuate in condizioni estremamente instabili e leggermente instabili, entrambe in presenza di vento debole, è reciprocamente simile ma differisce notevolmente dal comportamento che caratterizza le restanti tipologie di prove.

In Fig. 5.23, si riporta a titolo esemplificativo il grafico con le temperature registrate dalle sonde collocate in posizione 1 (S-1, D-1, e così via fino alla V-1) ossia alla distanza 5m a valle dalla zona di combustione, nelle condizioni estremamente instabili.

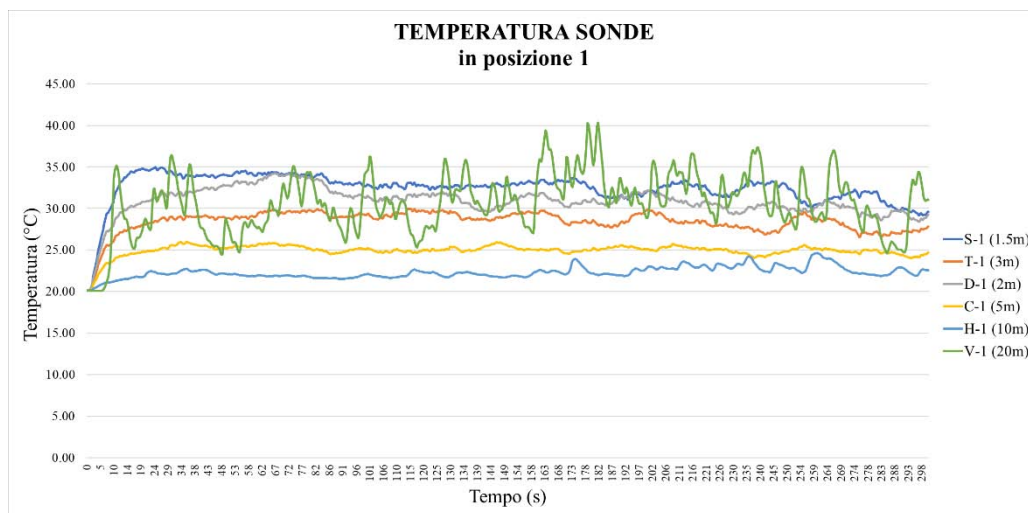


Figura 5.23: andamento della temperatura registrato, a varie altezze, dalle sonde poste 5m a valle in asse con il fuoco, durante la prova di combustione del polietilene in condizioni di estrema instabilità e vento debole

Le sonde posizionate ad altezza compresa fra 1.5m e 10m registrano un valore che si porta rapidamente a regime e subisce variazioni minime. Tutte le temperature sono comprese fra i 20° e i 35°C. Solo la sonda V-1, posta a 20m di altezza, fa eccezione: infatti presenta un andamento caratterizzato da continue fluttuazioni, le quali oscillano tra un minimo di 25°C e un massimo di 40°C.

Analizzando lo stesso grafico ottenuto con i risultati delle prove simulate con velocità del vento pari a 4 m/s, la situazione è diversa.

Si veda ad esempio il caso di combustione caratterizzato da leggera instabilità (Fig. 5.24)

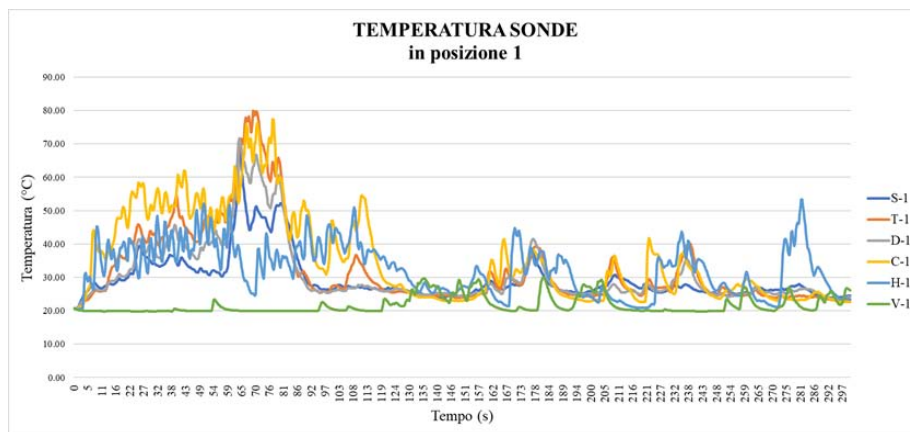


Figura 5.24: andamento della temperatura registrato, a varie altezze, dalle sonde poste 5m a valle in asse con il fuoco, durante la combustione del polietilene in condizioni di leggera instabilità e presenza di vento debole

Il comportamento delle temperature in questi casi, pur essendo registrato nella stessa posizione, presenta un andamento molto più frastagliato e altalenante. I primi minuti di combustione in particolare riportano un comune innalzamento nei valori di temperatura, con picchi che toccano gli 80°C.

Anche qui, fa eccezione solo la sonda V-1, posta all'altezza di 20m, che presenta una temperatura media di 21.7 °C. A registrare le temperature maggiori sono le sonde a quota 2m, 3m e 5m. Il picco massimo viene registrato dalla sonda T-1 (3m), circa a 70 secondi dall'inizio della combustione e si porta ad una temperatura di 79.9 °C. Nel grafico è possibile notare delle creste minori in corrispondenza dell'inizio del 3° e del 4° minuto di combustione.

Il fatto che le temperature della sonda V-1 siano notevolmente più basse si spiega considerando il che la forte intensità del vento piega la colonna dei fumi, la quale interessa la sezione bassa del dominio (soprattutto nei pressi del fuoco).

Per completezza, si riportano di seguito le tabelle con i valori di picco registrati dalle sonde nelle diverse condizioni di prova. (§Tab. 5.5 - §5.9)

Tab. 5.5: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polietilene in condizioni di forte instabilità e vento debole

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	20.13	20.13	20.13	20.12	20.12	20.10
T_{max}	34.98	34.20	29.99	26	24.64	40.35
Valore medio	32.48	30.89	28.45	24.96	22.31	30.64

Tab. 5.6: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polietilene in condizioni di leggera stabilità e vento debole

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	20.05	20.05	20.05	20.05	20.04	20
T_{max}	36.27	34.15	30.84	25.43	27.80	41.60
Valore medio	32.23	30.14	27.74	24.37	22.56	31.77

Tab. 5.7: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polietilene in condizioni di leggera instabilità e vento forte

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	20.67	20.65	20.64	20.60	20.46	19.85
T_{max}	69.37	71.63	79.88	77.47	53.29	30.11

Tab. 5.8: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polietilene in condizioni stabilità neutre e vento forte

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	20	20	20	20	20	20
T_{max}	49.59	60.04	63.88	72.95	56.84	34.42

Tab. 5.9: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polietilene in condizioni di leggera stabilità e vento forte

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50
T_{max}	52.12	55.73	67.52	82.58	51.26	29.11

Un altro dato molto importante che viene ora preso in considerazione, riguarda l'entità del flusso termico ossia quella grandezza utilizzata per esprimere la quantità di energia termica che viene emessa durante la combustione. Il parametro è di fondamentale importanza soprattutto nell'ottica di poter valutare quale sia l'impatto della combustione su persone, o cose, adiacenti la sorgente di emissione.

Il dato fornito dal programma, dà indicazione dell'energia termica rilasciata per m³. Si è ritenuto tuttavia maggiormente significativo utilizzare il valore di rilascio termico per unità di superficie (HRRPUA), ottenuto moltiplicando il valore restituito dal programma per la larghezza del dominio.

Di seguito si riporta un confronto fra i dati di HRRPUA ottenuti dalla combustione del polietilene in alcune tipologie di prove selezionate

I seguenti grafici confrontano il valore di HRRPUA ottenuto nelle prove di combustione effettuate in condizioni di forte instabilità con presenza di vento debole e leggera instabilità, condizioni ambientali neutre e leggera stabilità, in condizioni di vento forte, misurato in corrispondenza del fuoco (Fig. 5.25), a 3m (Fig. 5.26) e a 5m (Fig. 5.27) dallo stesso.

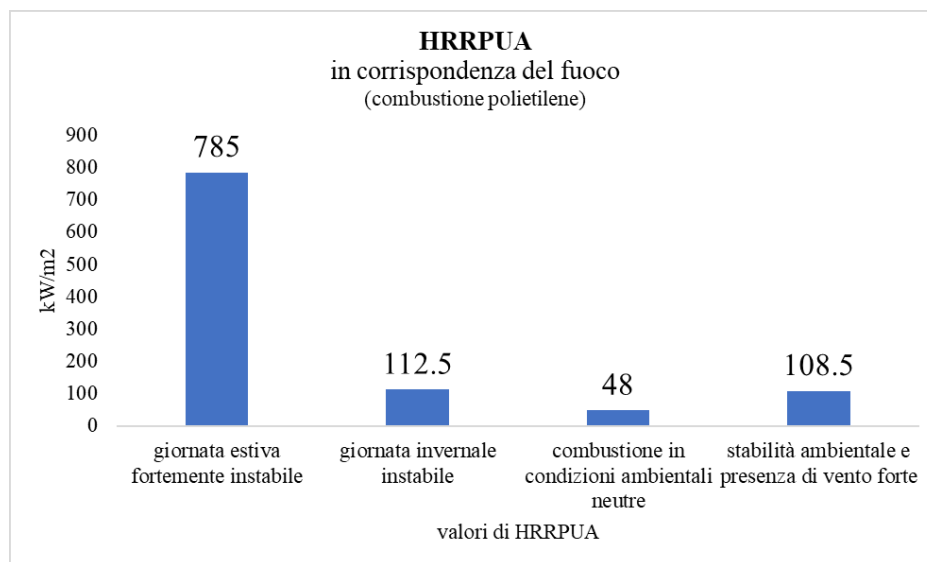


Figura 5.25: valori di HRRPUA misurati in corrispondenza del fuoco durante la combustione di polietilene in varie condizioni

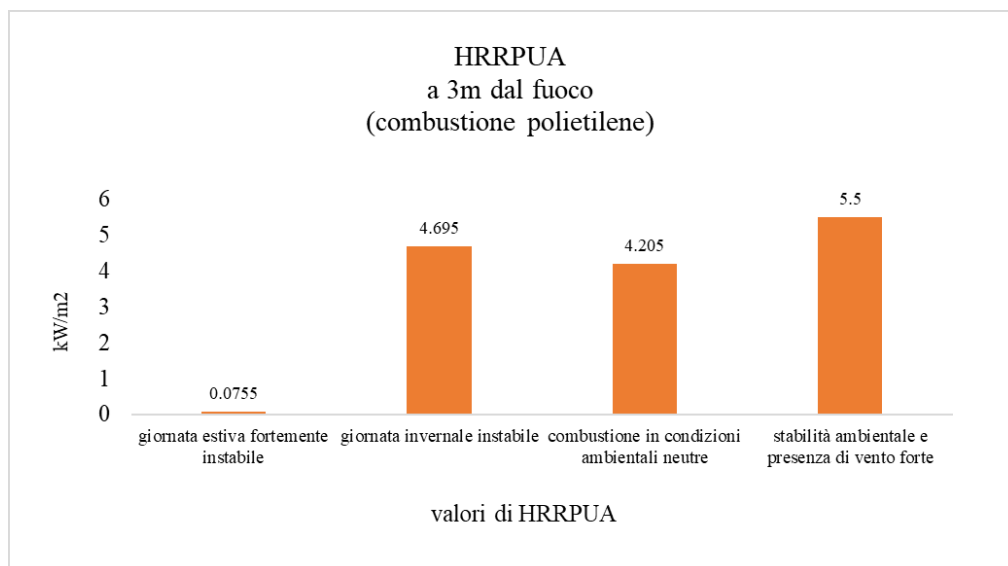


Figura 5.26: valori di HRRPUA misurati a 3m dal fuoco durante la combustione di polietilene in varie condizioni

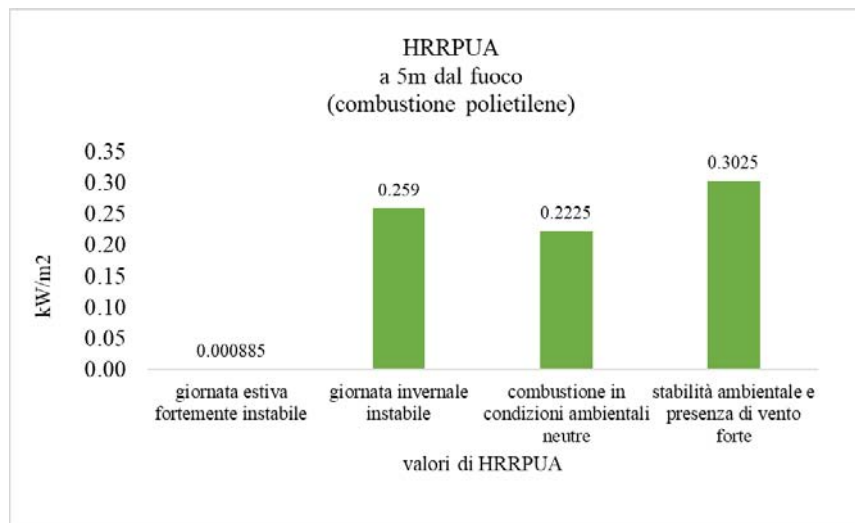


Figura 5.27: valori di HRRPUA misurati a 5m dal fuoco durante la combustione di polietilene in varie condizioni

Considerando i valori di energia irradiati si conclude che a distanza di 3m dal fuoco, le prove effettuate in condizioni di leggera instabilità e leggera stabilità in presenza di vento forte, presentano delle criticità nei confronti della presenza di persone.

5.3 Prove eseguite con polipropilene

Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle prove condotte utilizzando il polipropilene come matrice omogenea soggetta a combustione.

5.3.1 Analisi qualitativa dell'evoluzione del pennacchio dei fumi

Similmente ai casi analizzati affrontando il polietilene, anche nelle prove di combustione del polipropilene si riscontrano analogie tra i diversi scenari ipotizzati.

Innanzitutto, nelle due prove condotte applicando la presenza di vento debole al dominio, la dispersione dei fumi avviene verticalmente e la nube prodotta si espande solo una volta in quota. Si riportano di seguito delle immagini raffiguranti la situazione a 60 secondi e 300 secondi, rispettivamente nel dominio interessato da estrema instabilità atmosferica (Fig. 5.28 e Fig. 5.29) e leggera stabilità (Fig. 5.30 e Fig. 5.31).

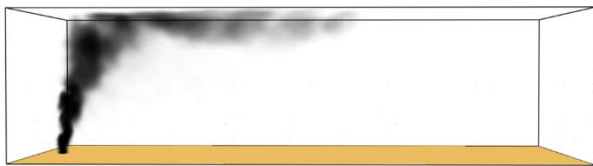


Figura 5.28: evoluzione del pennacchio di fumi, a 60s dall'inizio della combustione di polipropilene in condizioni di estrema instabilità atmosferica e presenza di vento debole ($v=1\text{m/s}$)



Figura 5.29: evoluzione del pennacchio di fumi, a 300s dall'inizio della combustione di polipropilene in condizioni di estrema instabilità atmosferica e presenza di vento debole ($v=1\text{m/s}$)



Figura 5.30: evoluzione del pennacchio di fumi, a 60s dall'inizio della combustione di polipropilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e presenza di vento debole ($v=1\text{m/s}$)

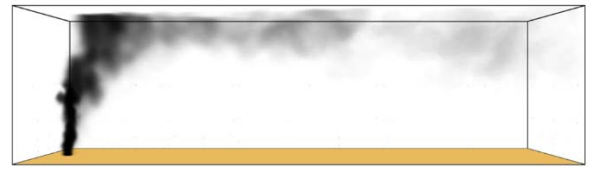


Figura 5.31: evoluzione del pennacchio di fumi, a 300s dall'inizio della combustione di polipropilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e presenza di vento debole ($v=1\text{m/s}$)

Diversa la situazione nelle prove effettuate ipotizzando la presenza di vento forte ($v=4\text{m/s}$). La colonna dei gas di combustione si propaga nel dominio mostrando evidenti segni di turbolenza.



Figura 5.32: evoluzione del pennacchio dei fumi, a 60s dall'inizio della combustione di polipropilene in condizioni di leggera instabilità atmosferica e presenza di vento forte ($v=4\text{m/s}$)



Figura 5.33: evoluzione del pennacchio dei fumi, a 300s dall'inizio della combustione di polipropilene in condizioni di leggera instabilità atmosferica e presenza di vento forte ($v=4\text{m/s}$)

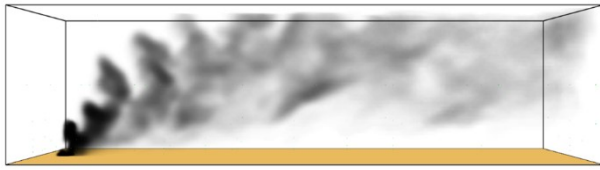


Figura 5.34: evoluzione del pennacchio dei fumi, a 60s dall'inizio della combustione di polipropilene in condizioni di stabilità atmosferica neutra e presenza di vento forte ($v=4m/s$)

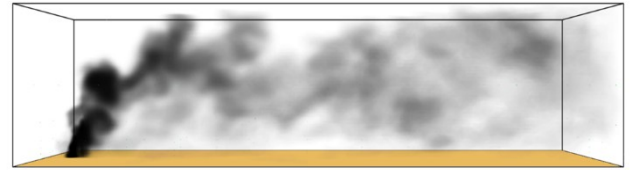


Figura 5.35: evoluzione del pennacchio dei fumi, a 300s dall'inizio della combustione di polipropilene in condizioni di stabilità atmosferica neutra e presenza di vento forte ($v=4m/s$)

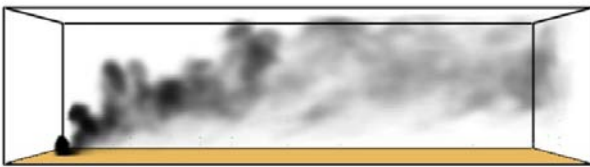


Figura 5.36: evoluzione del pennacchio dei fumi, a 60s dall'inizio della combustione di polipropilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e presenza di vento forte ($v=4m/s$)

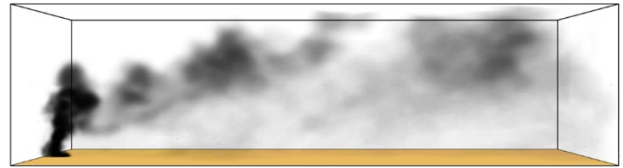


Figura 5.36: evoluzione del pennacchio dei fumi, a 300s dall'inizio della combustione di polipropilene in condizioni di leggera stabilità atmosferica e presenza di vento forte ($v=4m/s$)

I fumi di combustione risentono delle forti turbolenze e invadono gran parte del dominio, tanto che al quinto minuto quasi tutto il volume è occupato dal pennacchio. Questo, a differenza delle prove fatte con velocità del vento pari a 1m/s, fa sì che anche la metà inferiore del dominio sia interessata dai gas di combustione, con le conseguenti problematiche che ne derivano per l'eventuale presenza di persone.

5.3.2 Analisi dei prodotti di combustione

Si procede ora con l'analisi dei prodotti di combustione rinvenuti nel dominio.

Si riportano nella seguente tabella (Tab. 5.10) le concentrazioni di particolato rinvenute nel dominio durante le simulate prove di combustione con polipropilene. Sono prese in considerazione diverse condizioni ambientali. Inoltre, le misurazioni sono effettuate in corrispondenza del fuoco e poi a 3m, 5m e 10m. Le caselle contrassegnate con “-” segnalano che il dato non è disponibile.

Tab. 5.10: tabella con concentrazioni massime di particolato (soot) riscontrate nei piani di controllo posti in corrispondenza del fuoco e a 3m, 5m e 10m

CONCENTRAZIONI DI PARTICOLATO [g/kg]	distanza dal fuoco			
	0m	3m	5m	10
giornata estiva fortemente instabile	0.22	0.06	-	-
nottata stabile	0.21	0.06	-	-
giornata invernale instabile	0.095	0.06	0.033	-
PP combustione in condizioni ambientali neutre	0.093	0.07	0.033	0.023
stabilità ambientale e presenza di vento forte	0.075	0.058	0.028	-

Si ricorda che quelli elencati in tabella Tab. 5.10 sono solo i valori massimi registrati. Si ritiene pertanto interessante andare ad indagare quale sia la distribuzione delle concentrazioni di particolato nei piani perpendicolari allo sviluppo del dominio (e quindi alla direzione del vento) passanti per il fuoco e a 3m dallo stesso. Vengono selezionati due casi: uno in condizioni di vento debole e di estrema instabilità atmosferica, l'altro in condizioni di vento forte e leggera instabilità atmosferica. Per ognuno dei due casi verrà proposto un paragone della situazione a 60 e 300 secondi.

Le coppie di figure seguenti permettono il confronto delle concentrazioni di particolato ad uno stesso istante; a sinistra si trova il caso di giornata estiva fortemente instabile con vento che spira alla velocità di 1m/s, a destra invece il caso giornata invernale instabile caratterizzata da presenza di vento forte che soffia alla velocità di 4m/s.

Le prime quattro immagini rappresentano la situazione registrata sui piani di controllo passanti per il fuoco. (Fig. 5.37 – Fig. 5.40)

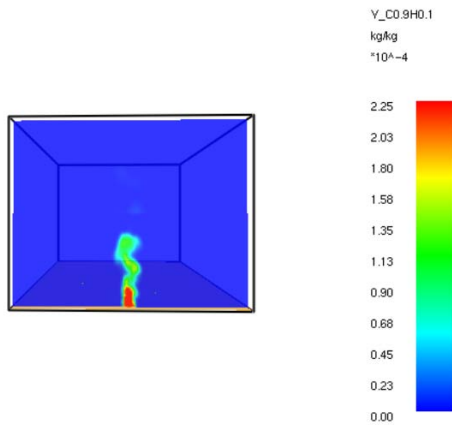


Fig. 5.37: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=60s$, registrata dal piano di controllo passante per il fuoco, durante la combustione di polipropilene in condizioni di estrema instabilità ambientale e vento debole ($v=1m/s$)

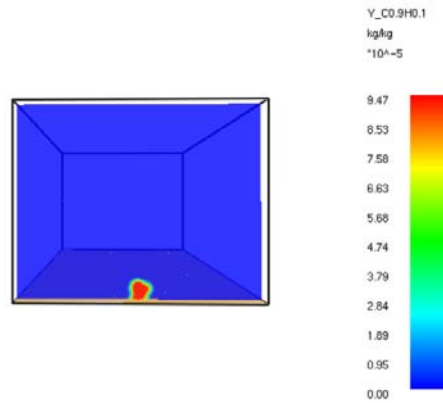


Fig. 5.38: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=60s$, registrata dal piano di controllo passante per il fuoco, durante la combustione di polipropilene in condizioni di leggera instabilità ambientale e vento forte ($v=4m/s$)

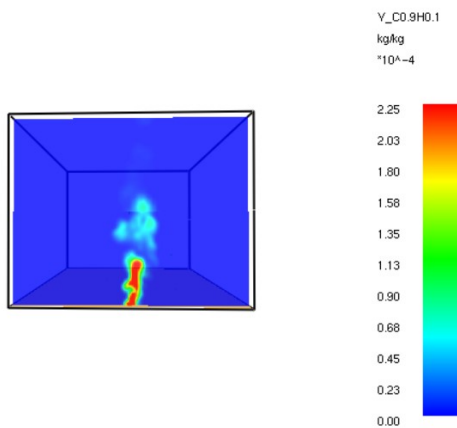


Fig. 5.39: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=300s$, registrata dal piano di controllo passante per il fuoco, durante la combustione di polipropilene in condizioni di estrema instabilità ambientale e vento debole ($v=1m/s$)

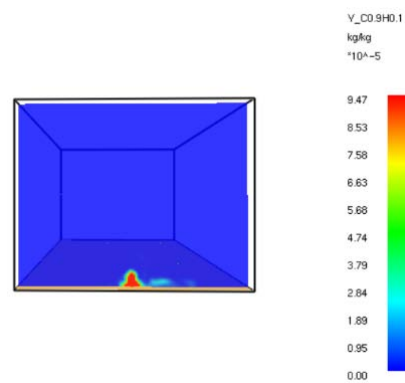


Fig. 5.40: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=300s$, registrata dal piano di controllo passante per il fuoco, durante la combustione di polipropilene in condizioni di leggera instabilità ambientale e vento forte ($v=4m/s$)

Le seguenti quattro immagini rappresentano invece la situazione registrata sui piani di controllo passanti a 3m dal fuoco. (Fig. 5.37 – Fig. 5.40)

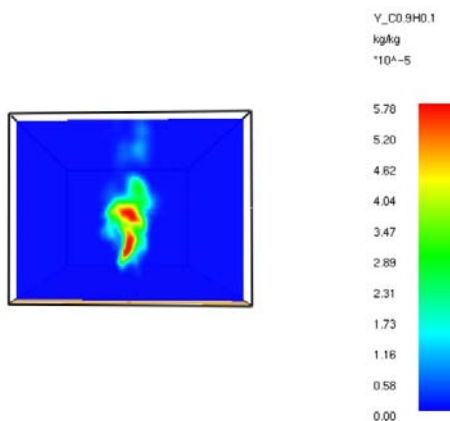


Fig. 5.41: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polipropilene in condizioni di estrema instabilità ambientale e vento debole ($v=1m/s$)

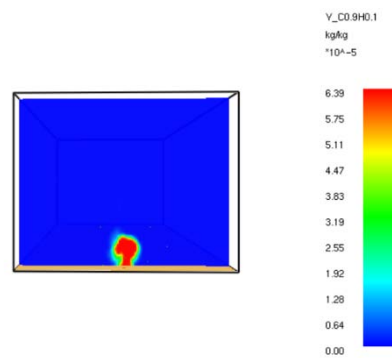


Fig. 5.42: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polipropilene in condizioni di leggera instabilità ambientale e vento forte ($v=4m/s$)

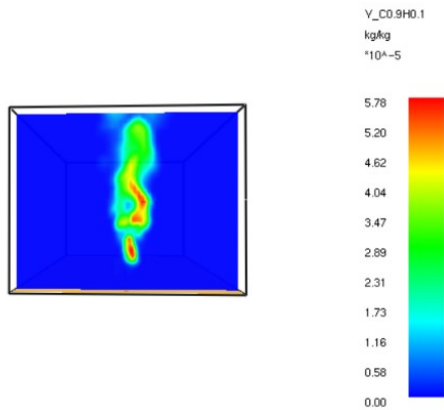


Fig. 5.43: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polipropilene in condizioni di estrema instabilità ambientale e vento debole ($v=1m/s$)

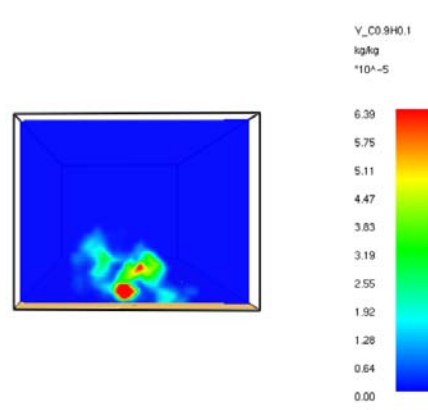


Fig. 5.44: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polipropilene in condizioni di leggera instabilità ambientale e vento forte ($v=4m/s$)

In corrispondenza del fuoco, le concentrazioni di particolato che si sviluppano nel caso di combustione in condizioni di estrema instabilità e velocità del vento pari a 1 m/s sono maggiori di quelle che si riscontrano in caso di combustione in condizioni di leggera instabilità ambientale e vento forte. Diversamente, a 3m dal fuoco le concentrazioni nei due casi presentano valori nello stesso ordine di grandezza e sono perciò paragonabili. Tuttavia, nel caso di combustione in presenza di vento forte la nube con il particolato si trova a quota inferiore e resta adagiata sul piano campagna, costituendo un fattore di criticità dei confronti dell'eventuale presenza di persone.

In tabella Tab. 5.11 sono invece riportate le concentrazioni massime di monossido di carbonio, registrate su piani di controllo posti perpendicolarmente alla lunghezza del dominio, a diverse distanze dal fuoco.

Tab. 5.11: tabella con concentrazioni massime di monossido di carbonio riscontrate nei piani di controllo posti in corrispondenza del fuoco e a 3m, 5m e 10m

CONCENTRAZIONI DI CO [g/kg]	distanza dal fuoco		
	0 m	3 m	5 m
giornata estiva fortemente instabile	0.09	-	-
nottata stabile	0.087	-	-
PP giornata invernale instabile	0.038	0.026	-
combustione in condizioni ambientali neutre	0.038	0.027	0.013
stabilità ambientale e presenza di vento forte	0.030	0.024	-

Le concentrazioni di CO che si riscontrano sul piano di controllo posto in corrispondenza del fuoco, nei casi caratterizzati da presenza di vento debole, presentano valori sostanzialmente uguali, superiori al doppio delle concentrazioni rilevate nei casi con presenza di vento forte. Tuttavia, in questi ultimi è possibile rilevare concentrazioni di monossido di carbonio più a valle, fino a una distanza di 3m dal fuoco e, nel caso di combustione in condizioni ambientali neutre, addirittura a 5m dal fuoco.

Si riportano di seguito, l'evoluzione della distribuzione delle concentrazioni di CO sul piano di controllo posto in corrispondenza del fuoco nelle condizioni espresse dalla prima riga della tabella. Inoltre, si fa seguire un confronto fra le concentrazioni di CO sui vari piani di controllo ad un istante di tempo definito.

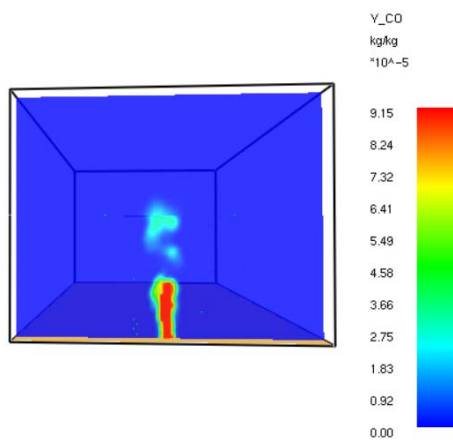


Fig. 5.45: concentrazione di monossido di carbonio, all'istante $t=60s$, riscontrata sul piano di controllo perpendicolare all'estensione del dominio e posizionato in corrispondenza con il fuoco, (combustione in condizioni di forte instabilità e presenza di vento debole)

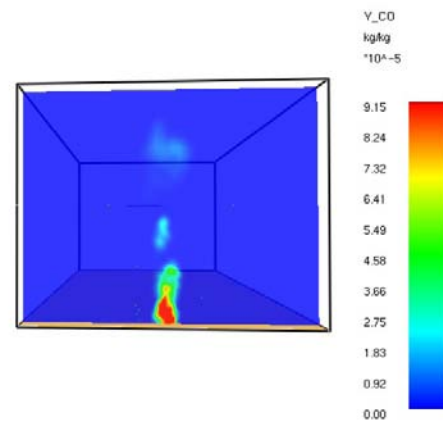


Fig. 5.46: concentrazione di monossido di carbonio, all'istante $t=180s$, riscontrata sul piano di controllo perpendicolare all'estensione del dominio e posizionato in corrispondenza con il fuoco, (combustione in condizioni di forte instabilità e presenza di vento debole)

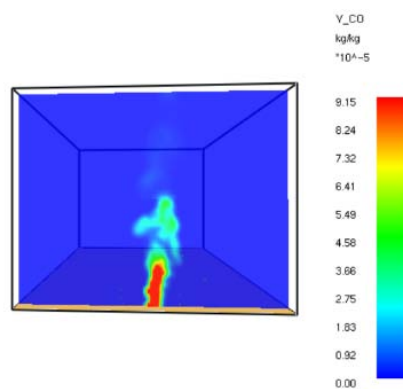


Fig. 5.47: concentrazione di monossido di carbonio, all'istante $t=300s$, riscontrata sul piano di controllo perpendicolare all'estensione del dominio e posizionato in corrispondenza con il fuoco, (combustione in condizioni di forte instabilità e presenza di vento debole)

Inoltre, si è scelto di effettuare il confronto fra le distribuzioni di concentrazione di CO a differenti distanze dal fuoco, considerando la situazione al tempo t pari a 180 secondi. (Fig. 5.48 – Fig. 5.50)

Si presti attenzione al fatto che ogni immagine presenta una propria scala di valori e che ad uno stesso colore possono corrispondere concentrazioni diverse in due immagini distinte.

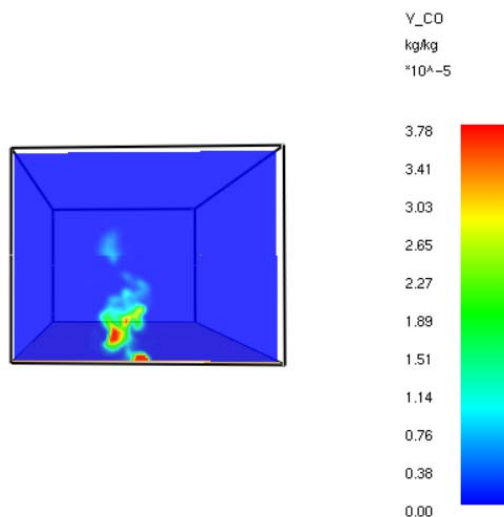


Fig. 5.48: concentrazione di monossido di carbonio, all'istante $t=180s$, riscontrata sul piano di controllo perpendicolare all'estensione del dominio e posizionato in corrispondenza con il fuoco, (combustione in condizioni di stabilità atmosferica neutra e presenza di vento forte)

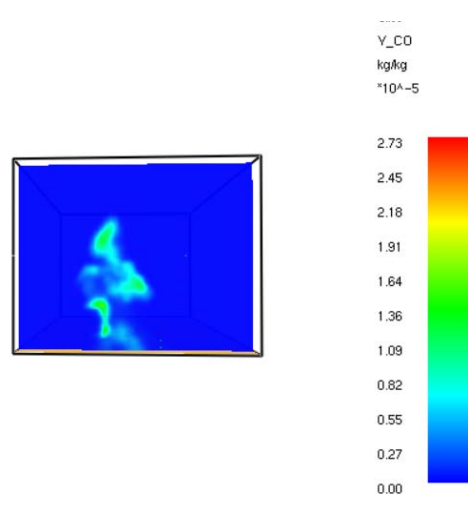


Fig. 5.49: concentrazione di monossido di carbonio, all'istante $t=180s$, riscontrata sul piano di controllo perpendicolare all'estensione del dominio e posizionato a 3m dal fuoco, (combustione in condizioni di stabilità atmosferica neutra e presenza di vento forte)

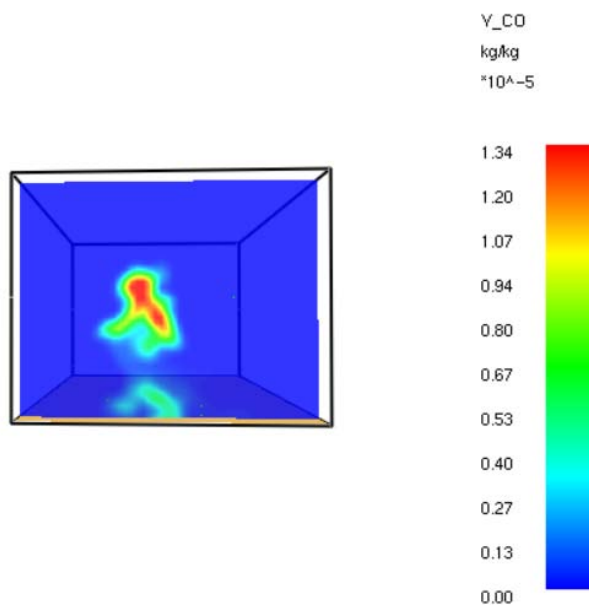


Fig. 5.50: concentrazione di monossido di carbonio, all'istante $t=180s$, riscontrata sul piano di controllo perpendicolare all'estensione del dominio e posizionato a 5m dal fuoco, (combustione in condizioni di stabilità atmosferica neutra e presenza di vento forte)

La frazione di monossido di carbonio viene veicolata nel dominio a distanze maggiori nelle condizioni neutre di stabilità atmosferica se in presenza di vento sostenuto. La nube degli inquinanti attraversa il volume mantenendosi sospesa nella parte centrale della sezione.

Infine, si riportano nella seguente tabella i picchi massimi raggiunti dalla concentrazione di anidride carbonica. Anche in questo caso sono stati considerati i valori nei piani di controllo perpendicolari alla direzione prevalente del dominio.

Tab. 5.12: tabella con concentrazioni massime di anidride carbonica riscontrate nei piani di controllo posti in corrispondenza a 5m, 10m, 20m e 40m a distanza dal fuoco

CONCENTRAZIONI DI CO ₂ [g/kg]	distanza dal fuoco			
	5m	10m	20m	40m
giornata estiva fortemente instabile	1.64	0.94	0.40	0.21
nottata stabile	1.69	1.02	0.5	0.23
giornata invernale instabile	1.64	1.18	0.76	0.41
PP combustione in condizioni ambientali neutre	1.61	1.15	0.74	0.39
stabilità ambientale e presenza di vento forte	1.37	1.03	0.69	0.39

Si riporta di seguito un confronto fra le concentrazioni di anidride carbonica rilevate a 60 secondi dall'inizio della combustione e registrate su piani perpendicolari alla lunghezza del dominio, rispettivamente in corrispondenza del fuoco e poi a distanza pari a 5m, 10m e 20m dallo stesso. Le condizioni della prova prevedono forte instabilità atmosferica e presenza di vento debole.

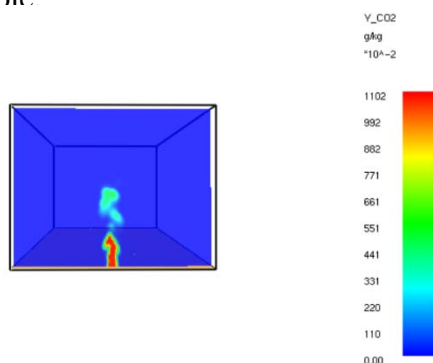


Figura 5.51: concentrazione di anidride carbonica rilevata, a t=60s, sul piano di controllo posto in corrispondenza del fuoco, durante la combustione del polipropilene, in condizioni di forte instabilità atmosferica e presenza di vento debole

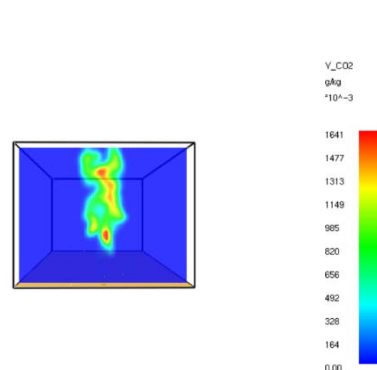


Figura 5.52: concentrazione di anidride carbonica rilevata, a t=60s, sul piano di controllo posto a 5m di distanza dal fuoco, durante la combustione del polipropilene, in condizioni di forte instabilità atmosferica e

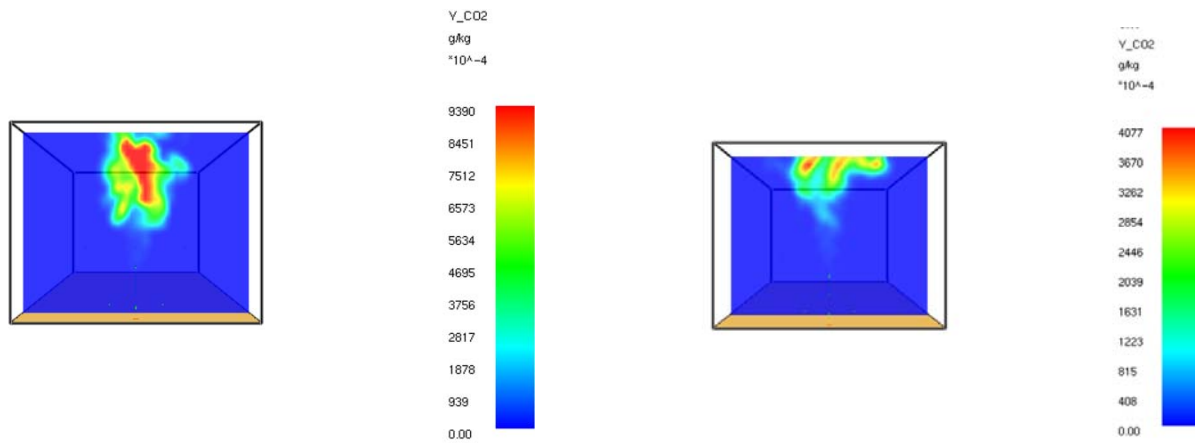


Figura 5.53: concentrazione di anidride carbonica rilevata, a $t=60s$, sul piano di controllo posto a 10m di distanza dal fuoco, durante la combustione del polipropilene, in condizioni di forte instabilità atmosferica e presenza di vento debole

Figura 5.54: concentrazione di anidride carbonica rilevata, a $t=60s$, sul piano di controllo posto a 10m di distanza dal fuoco, durante la combustione del polipropilene, in condizioni di forte instabilità atmosferica e presenza di vento debole

La distribuzione degli inquinanti rispecchia la posizione nello spazio del pennacchio e quindi, coerentemente con quanto visto nel paragrafo 5.3.1, per la prova presa in considerazione nel confronto appena presentato le concentrazioni maggiori si posizionano nella parte alta del dominio.

Diversamente, nel caso caratterizzato da leggera instabilità ambientale e vento forte, la distribuzione prevalente di CO_2 si posiziona nella parte bassa del dominio. Si riportano di seguito due esempi di quanto appena detto, ossia un'istantanea delle distribuzioni di anidride carbonica sui piani di controllo posti a 10m dal fuoco e corrispondenti al secondo 60 e 300 del processo di combustione.

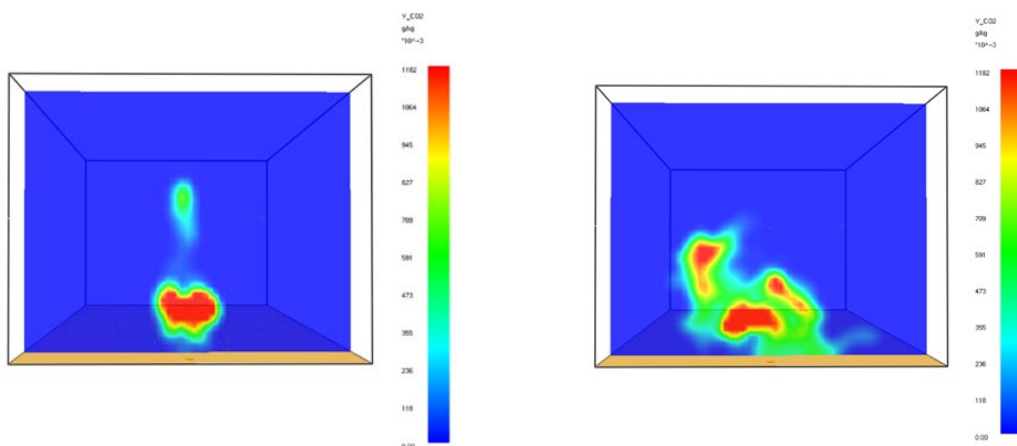


Figura 5.55: concentrazione di anidride carbonica rilevata, a $t=60s$, sul piano di controllo posto a 10m di distanza dal fuoco, durante la combustione del polipropilene, in condizioni di leggera instabilità atmosferica e presenza di vento forte

Figura 5.56: concentrazione di anidride carbonica rilevata, a $t=300s$, sul piano di controllo posto a 10m di distanza dal fuoco, durante la combustione del polipropilene, in condizioni di leggera instabilità atmosferica e presenza di vento forte

Inoltre, le concentrazioni rilevate a 10m in questo caso sono maggiori rispetto a quelle rilevate nella stessa posizione ma in scenari caratterizzati da ventosità meno intensa.

5.3.3 Analisi termica

Si vedano ora, nella presente sezione, alcuni approfondire sugli aspetti termici correlati alle prove di combustione.

Un aspetto molto interessante da tenere in considerazione riguarda la temperatura dei gas di combustione che si liberano in aria. Come già visto, per descrivere l'andamento delle temperature si sono utilizzati risultati ottenuti dai dispositivi di controllo puntiformi posizionati nel dominio. In particolar modo si prendono in considerazione i valori forniti dalle sonde poste in posizione 1, vale a dire 5m a valle in asse con il fuoco. Sono disponibili misurazioni a varie altezze, comprese tra 1.5m e 20m.

Anche in questo caso, le prove condotte in condizioni di forte instabilità ambientale e leggera stabilità ambientale (entrambe con presenza di vento debole) presentano un andamento delle temperature molto simile. Si veda ad esempio il grafico elaborato nelle condizioni ambientali estremamente instabili con presenza di vento alla velocità di 1 m/s e riportato in Fig. 5.57.

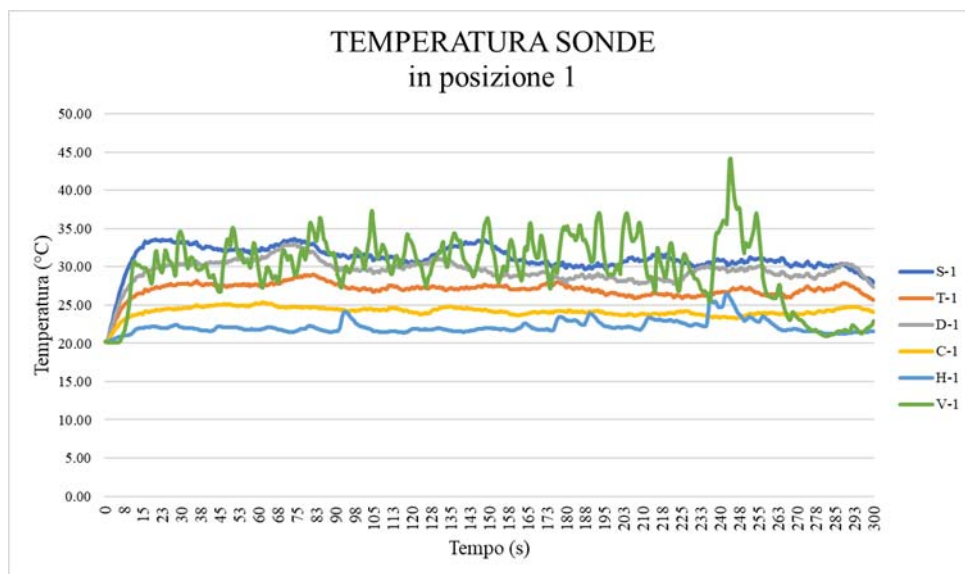


Figura 5.57: andamento della temperatura registrato, a varie altezze, dalle sonde poste 5m a valle e in asse con il fuoco, nel caso di combustione del polipropilene in condizioni di forte instabilità ambientale e vento forte

Le temperature registrate dalle sonde in posizione 1, a 5m di distanza e in asse con il fuoco, sono pressoché stabilizzate sul proprio valore di riferimento, ad eccezione della sonda V-1 che presenta profonde fluttuazioni. Quest'ultima continua ad oscillare, raggiungendo il picco massimo pari a 44 °C e il minimo pari a 20°C.

Il caso caratterizzato da leggera stabilità ambientale e vento debole, presenta un andamento delle temperature del tutto analogo. Si riportano in Tab. 5.13 e Tab. 5.14 alcuni valori caratteristici per ogni sonda, come ad esempio i picchi registrati (massimi/minimi) e il valore medio.

Tab. 5.13: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polipropilene in condizioni di forte instabilità e vento debole

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	20.22	20.21	20.21	20.21	20.20	20.04
T_{max}	33.68	32.99	28.99	25.38	26.55	44.13
Valore medio	31.14	29.48	27	24.17	22.15	29.21

Tab. 5.14: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polipropilene in condizioni di leggera stabilità e vento debole

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	20	20	20	20	20	20
T_{max}	34.80	31.60	28.20	24.80	28.80	31.52
Valore medio	29.22	28.77	25.69	23.84	22.54	40

Le prove di combustione eseguite in presenza di vento forte (4 m/s) presentano invece un andamento di temperatura diverso.

Si prenda ad esempio in considerazione il caso di leggera instabilità ambientale. Il grafico in Fig. 5.58 riporta le temperature registrate dalle sonde in posizione 1, collocate a varie altezze nello spazio.

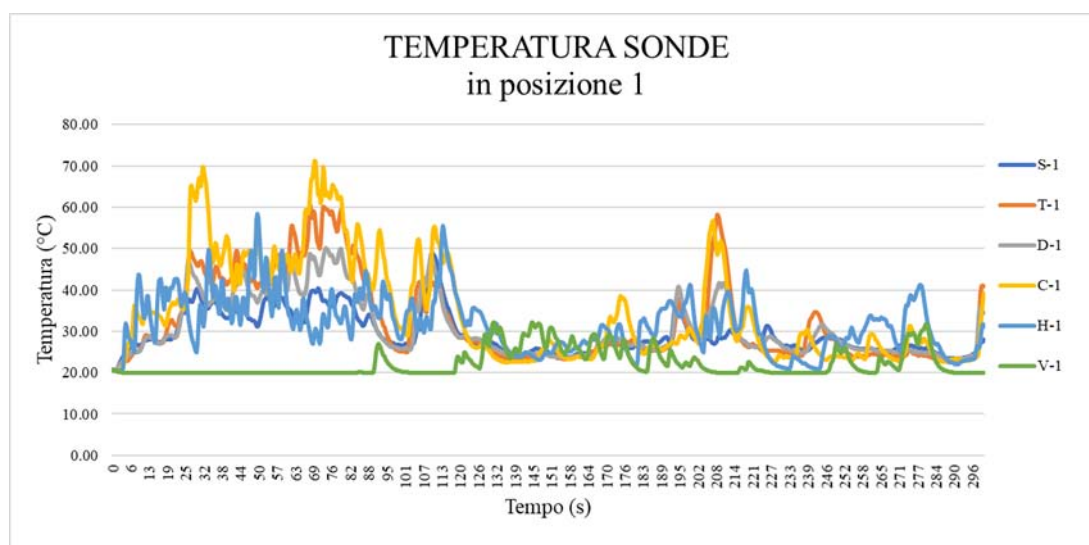


Figura 5.58: andamento della temperatura registrato, a varie altezze, dalle sonde poste 5m a valle e in asse con il fuoco nel caso di combustione del polipropilene in condizioni di leggera instabilità e presenza di vento forte.

L'andamento complessivo delle temperature risulta molto variabile ed è caratterizzato da un generale aumento nei primi due minuti di combustione e all'inizio del quarto minuto (Fig. 5.58). Fa eccezione a questa tendenza, l'evoluzione temporale dei valori misurati dalla sonda V-1 posta a 20m di altezza. Quest'ultima si mantiene alla temperatura di 20 °C, salvo presentare una cresta di picchi proprio in corrispondenza dell'abbassamento di temperatura misurato dalle altre sonde. In ogni caso la temperatura misurata da V-1 non supera mai i 32°C.

Anche in questo caso, l'andamento delle altre due prove è paragonabile. Si riportano nelle seguenti tabelle i valori caratteristici di temperatura registrati dalle varie sonde rispettivamente nelle condizioni di:

- Condizioni di leggera instabilità ambientale e presenza di vento forte (§Tab. 5.15)
- Condizioni atmosferiche neutre e presenza di vento forte (§Tab. 5.16)
- Condizioni di leggera stabilità ambientale e presenza di vento forte (§Tab. 5.17)

Tab. 5.15: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polipropilene in condizioni di leggera instabilità e vento forte

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	20.67	20.65	20.64	20.60	20.45	19.84
T_{max}	48.91	50.23	60.41	71.36	58.53	32.24

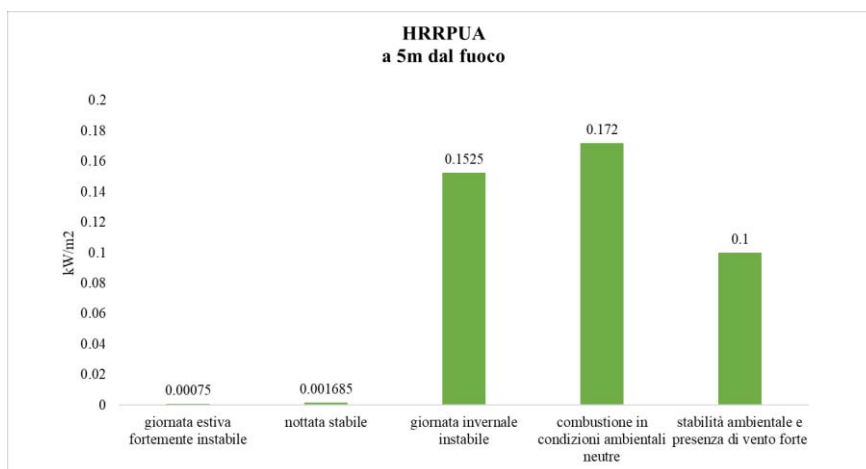
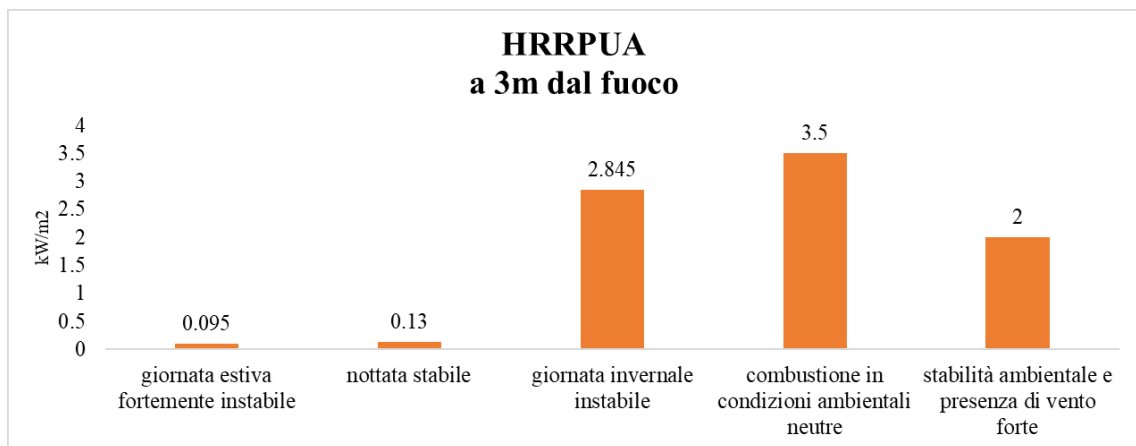
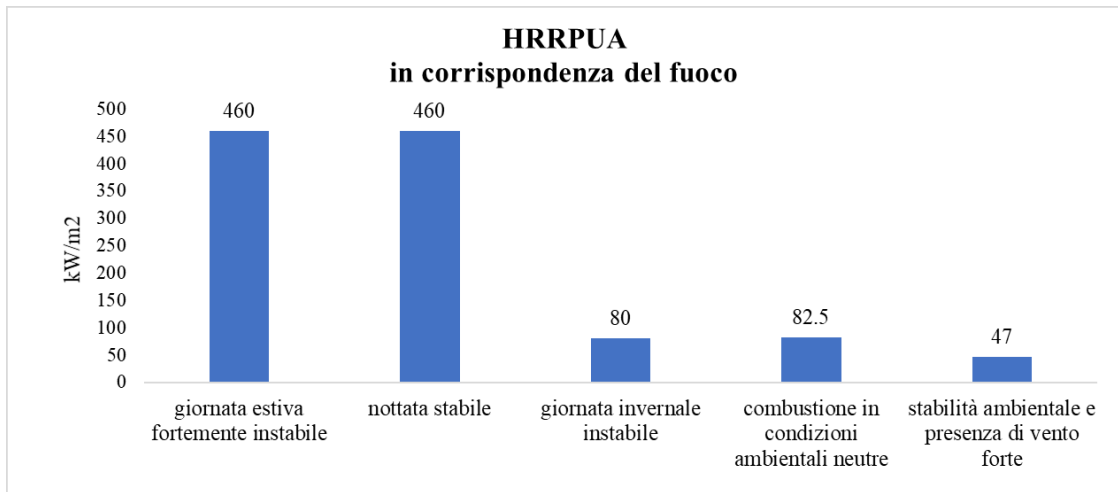
Tab. 5.17: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polipropilene in condizioni stabilità ambientale neutra e vento forte

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	20	20	20	20	20	20
T_{max}	42.59	47.95	56.30	61.75	50.38	33.48

Tab. 5.18: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polipropilene in condizioni di leggera stabilità e vento forte

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50
T_{max}	40.45	54.75	59.92	73.72	53.46	32.25

Si riportano qui di seguito i valori di HRRPUA, ossia di flusso termico per unità di superficie, irradiato dal corpo soggetto a combustione. I valori di riferimento sono presi in corrispondenza del fuoco e poi a 3m e 5m dallo stesso.



5.4 Prove eseguite con polistirene

Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle prove condotte utilizzando il polistirene come matrice omogenea soggetta a combustione.

5.4.1 Analisi qualitativa dell'evoluzione del pennacchio dei fumi

La prima cosa che si nota subito rispetto alle prove di combustione eseguite con polietilene e polipropilene è che la colonna di fumi che si erge dal focolare si presenta come molto più densa e copiosa. Per il resto, il comportamento è simile quello già visto per i casi fin qui trattati.

Nel caso di combustioni in condizioni di forte instabilità atmosferica con vento debole e leggera stabilità con vento debole, la colonna di fumi si alza verticalmente verso il cielo e comincia a disperdersi solo una volta in quota (circa 40 metri).

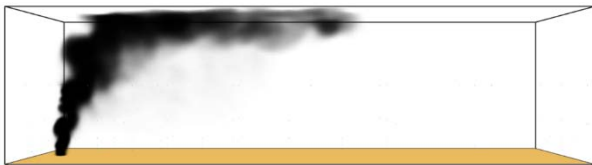


Figura 5.59: *evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di forte instabilità e vento debole a t=60s*



Figura 5.60: *evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di forte instabilità e vento debole a t=300s*



Figura 5.61: *evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di leggera stabilità e vento debole a t=60s*



Figura 5.62: *evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di leggera stabilità e vento debole a t=300s*

Diversamente, nelle condizioni di leggera instabilità, leggera stabilità e condizioni ambientali neutre con presenza di vento forte, la dispersione dei fumi è fortemente accentuata.



Figura 5.63: *evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di leggera instabilità e vento forte a t=60s*



Figura 5.64: *evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di leggera instabilità e vento forte a t=300s*

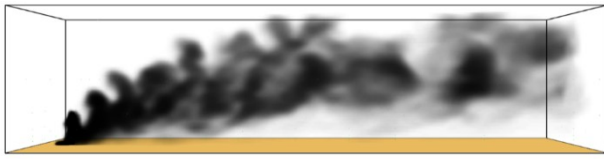


Figura 5.65: evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di stabilità neutra e vento forte a $t=60s$

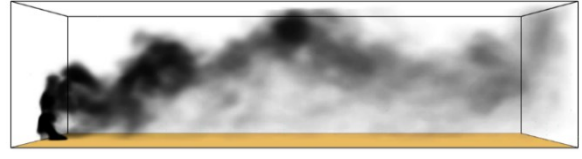


Figura 5.66: evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di stabilità neutra e vento forte a $t=300s$



Figura 5.67: evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di leggera stabilità e vento forte a $t=60s$



Figura 5.68: evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di leggera stabilità e vento forte a $t=300s$

In linea generale valgono le considerazioni già effettuate per il galleggiamento dei fumi caldi nei precedenti paragrafi (§5.2.1 e §5.3.1)

Considerando invece il caso in cui sono state modificate le dimensioni del *vent*, la situazione cambia notevolmente.

Si prendano in considerazione, ad esempio, le prove con *vent* di dimensioni pari a 5m x 5m e 10m x 10m. La colonna dei fumi di combustione si solleva copiosamente dalla superficie di combustione e invade il dominio. Valgono le considerazioni di dispersione già viste per le condizioni di prova con forte instabilità e vento debole.

Si ritiene opportuno ricordare che in questi due casi, è stato aumentato anche il volume del dominio e portato alle dimensioni di 200x70x70m.



Figura 5.69: evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di forte instabilità e vento debole, a $t=60s$ (dimensioni vent 5m x 5m)



Figura 5.70: evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di forte instabilità e vento debole, a $t=300s$ (dimensioni vent 5m x 5m)

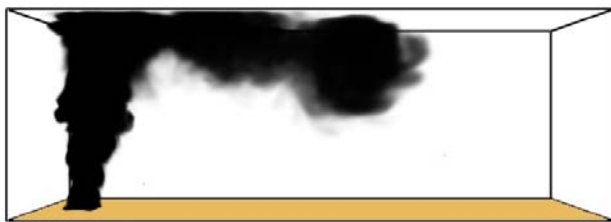


Figura 5.71: evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di forte instabilità e vento debole, a $t=60s$ (dimensioni vent $10m \times 10m$)



Figura 5.72: evoluzione del pennacchio di fumi nel caso di combustione del polistirene in condizioni di forte instabilità e vento debole, a $t=180s$ (dimensioni vent $10m \times 10m$)

5.4.2 Analisi dei prodotti di combustione

Si procede ora con l'analisi dei prodotti di combustione rinvenuti nel dominio.

La seguente tabella (Tab. 5.19) indica le concentrazioni di particolato massime rilevate dai piani di controllo durante la combustione del polistirene nel caso base (dimensioni vent pari a $1 \times 1m$). Le misurazioni sono effettuate in corrispondenza del fuoco e poi a 3m, 5m e 10m. Le caselle contrassegnate con “-” segnalano che il dato non è disponibile.

Tab. 5.19: tabella con concentrazioni massime di particolato riscontrate nei piani di controllo posti in corrispondenza del fuoco e a 3m, 5m e 10m (superficie di combustione $1m^2$)

CONCENTRAZIONI DI PARTICOLATO [g/kg]	distanza dal fuoco				
	0m	3m	5m	10	
PS	giornata estiva fortemente instabile	0.55	0.14	0.084	0.052
	nottata stabile	0.47	0.156	0.089	0.054
	giornata invernale instabile	0.20	0.14	0.072	0.055
	combustione in condizioni ambientali neutre	0.187	0.14	0.072	0.054
	stabilità ambientale e presenza di vento forte	0.16	0.13	0.065	0.49

Per approfondire la trattazione e renderla più accurata, si ritiene utile selezionare e indagare ulteriori caratteristiche di almeno un paio di casi fra quelli riportati in Tab. 5.19. A tal proposito si selezionano:

- Nottata stabile (condizioni ambientali leggermente stabili e presenza di vento debole)
- Giornata invernale instabile (condizioni ambientali leggermente instabili e presenza di vento forte)

Nel primo caso si propone un confronto tra le concentrazioni di particolato a 3m e 5m in vari istanti della combustione.

Le figure dalla Fig. 5.73 alla Fig. 5.75 riportano la variazione di concentrazione del particolato sul piano di controllo a distanza di 3 metri dal fuoco.

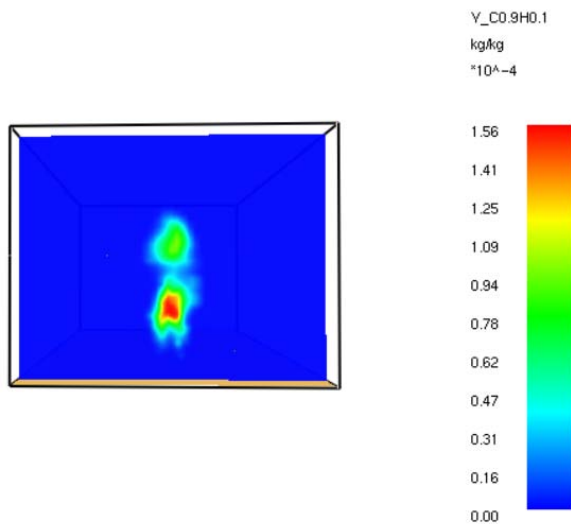


Fig. 5.73: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento debole ($v=1m/s$)

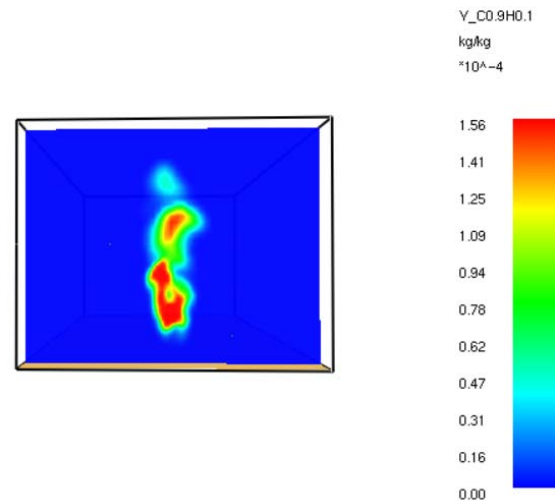


Fig. 5.74: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=180s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento debole ($v=1m/s$)

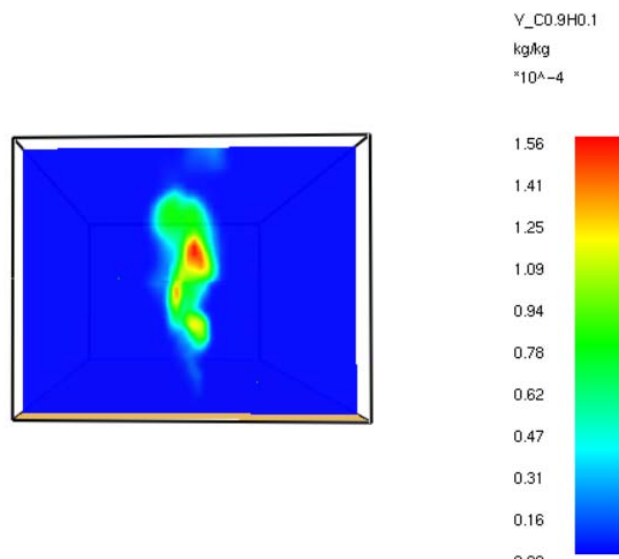


Fig. 5.75: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento debole ($v=1m/s$)

Le figure Fig. 5.76 e Fig. 5.77 riportano la variazione di concentrazione del particolato sul piano di controllo a distanza di 5 metri dal fuoco.

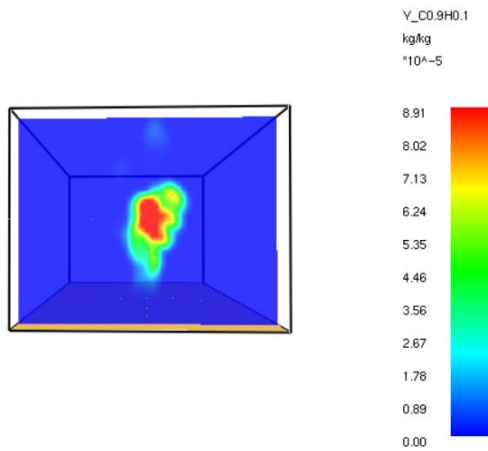


Fig. 5.76: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 5m dal fuoco ($X=12$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento debole ($v=1m/s$)

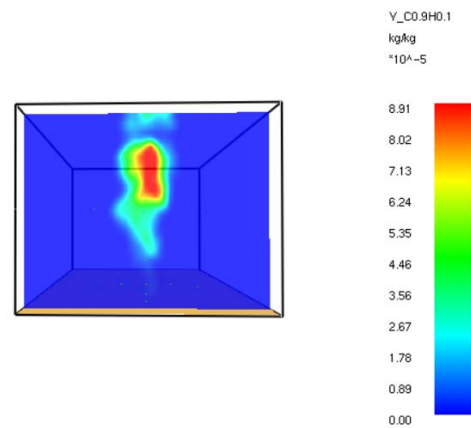


Fig. 5.77: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 5m dal fuoco ($X=12$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento debole ($v=1m/s$)

Considerando invece il caso di combustione in condizioni ambientali leggermente instabili e presenza di vento forte, si propone di seguito un confronto fra le concentrazioni a 60 secondi e 300 secondi, rispettivamente nel piano di controllo a 3m dal fuoco e a 5m dal fuoco.

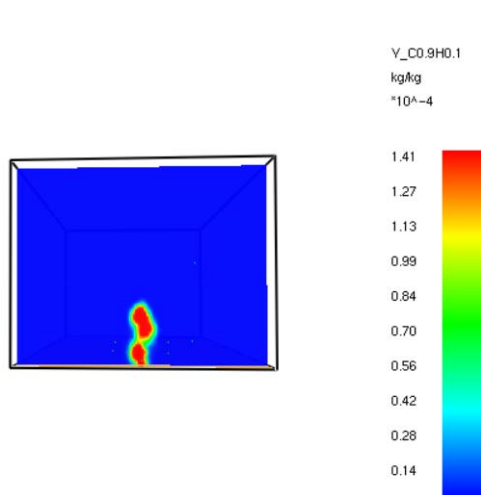


Fig. 5.78: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera instabilità ambientale e vento forte ($v=4m/s$)

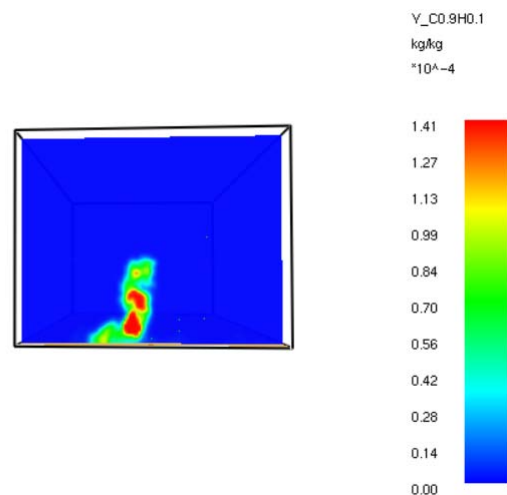


Fig. 5.79: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera instabilità ambientale e vento forte ($v=4m/s$)

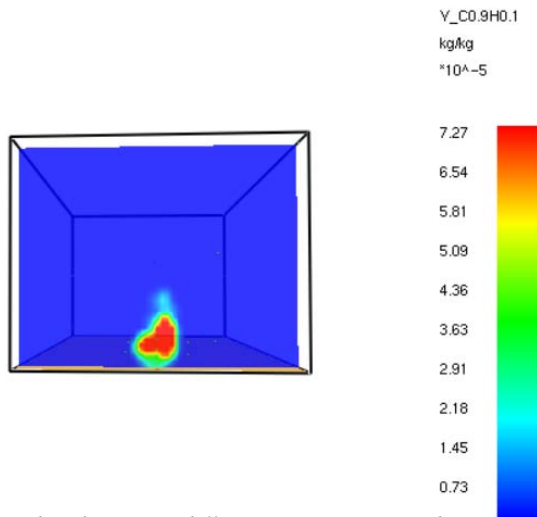


Fig. 5.80: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 5m dal fuoco ($X=12$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera instabilità ambientale e vento forte ($v=4m/s$)

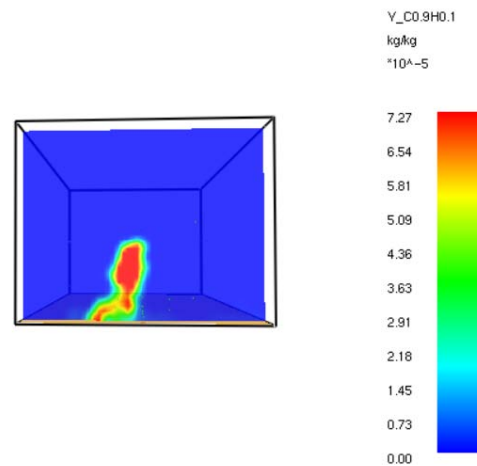


Fig. 5.81: distribuzione della concentrazione di particolato (soot), a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 5m dal fuoco ($X=12$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera instabilità ambientale e vento forte ($v=4m/s$)

La seguente tabella, Tab. 5.20 riporta invece i valori massimi di concentrazione di monossido di carbonio, riscontrati nel dominio durante la combustione di polistirene, in diverse condizioni ambientali. Le misurazioni sono effettuate in corrispondenza del fuoco, e poi a 3m, 5m e 10m. Le caselle contrassegnate con “-” segnalano che il dato non è disponibile.

Tab. 5.20: tabella con concentrazioni massime di monossido di carbonio riscontrate nei piani di controllo posti in corrispondenza del fuoco e a 3m, 5m e 10m

CONCENTRAZIONI DI CO [g/kg]	distanza dal fuoco		
	0m	3	5
giornata estiva fortemente instabile	0.2	0.052	-
nottata stabile	0.17	0.057	-
PS giornata invernale instabile	0.073	0.051	0.026
combustione in condizioni ambientali neutre	0.068	0.052	0.026
stabilità ambientale e presenza di vento forte	0.06	0.048	0.024

Tra i casi elencati in tabella 5.20 si prendono in considerazione il primo e il quarto; per ognuno di essi si riporta di seguito un confronto tra le concentrazioni a 60 e 300 secondi, rilevate dal piano di controllo posizionato a 3m dal fuoco.

Le figure 5.82 e 5.83 riportano la distribuzione di CO prodotta durante la combustione di polistirene, in condizioni di forte instabilità e vento debole, rilevata dal piano di controllo posizionato a 3m di distanza dal fuoco.

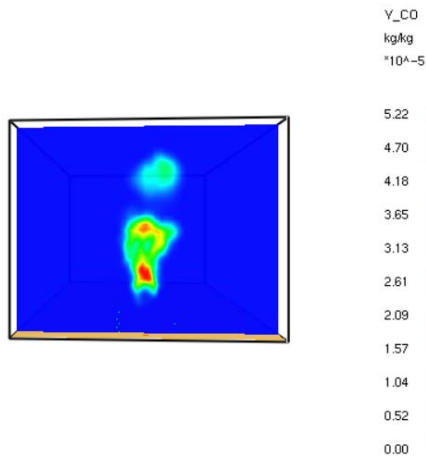


Fig. 5.82: distribuzione della concentrazione di monossido di carbonio a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polistirene in condizioni di forte instabilità ambientale e vento debole ($v=1$ m/s)

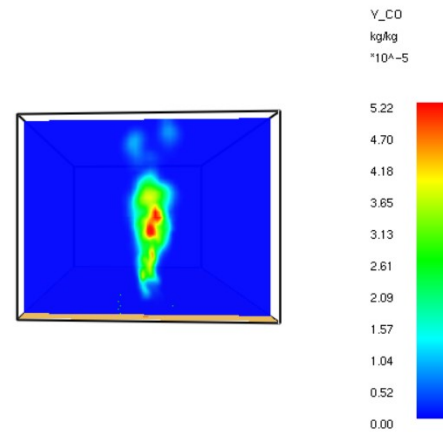


Fig. 5.83: distribuzione della concentrazione di monossido di carbonio a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polistirene in condizioni di forte instabilità ambientale e vento debole ($v=1$ m/s)

Le figure 5.84 e 5.85 riportano la distribuzione di CO prodotta durante la combustione di polistirene, in condizioni di leggera instabilità e vento forte, rilevata dal piano di controllo posizionato a 3m di distanza dal fuoco.

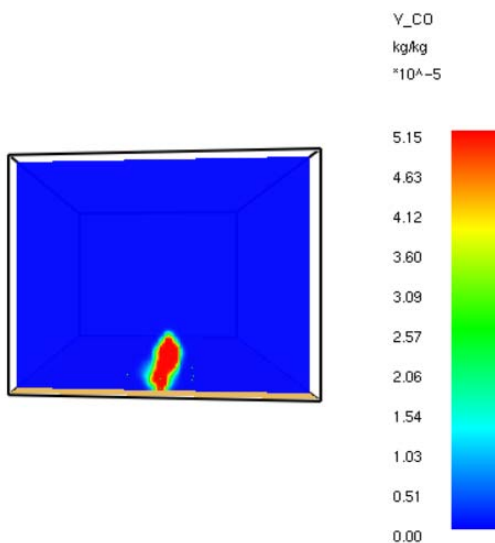


Fig. 5.84: distribuzione della concentrazione di monossido di carbonio a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera instabilità ambientale e vento forte ($v=4$ m/s)

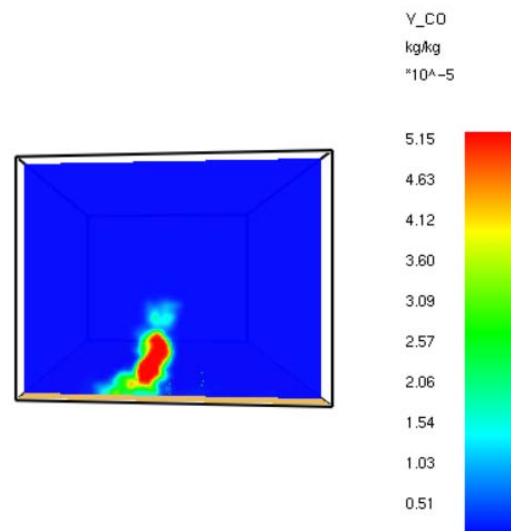


Fig. 5.85: distribuzione della concentrazione di monossido di carbonio a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco ($X=10$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera instabilità ambientale e vento forte ($v=4$ m/s)

Infine, si riporta di seguito una tabella (§Tab. 5.21) con valori di concentrazione di anidride carbonica, rilevati sui piani di controllo posti a 5m, 10m, 20m e 40m di distanza dal fuoco.

Tab. 5.21: tabella con concentrazioni massime di anidride carbonica riscontrate nei piani di controllo posti a valle del fuoco rispettivamente a 3m, 5m e 10m

CONCENTRAZIONI DI CO ₂ [g/kg]	distanza dal fuoco			
	5m	10m	20m	40m
giornata estiva fortemente instabile	1.39	0.86	0.42	0.21
nottata stabile	1.46	0.89	0.49	0.22
giornata invernale instabile	1.2	0.9	0.59	0.33
PS combustione in condizioni ambientali neutre	1.18	0.89	0.61	0.33
stabilità ambientale e presenza di vento forte	1.18	1.3	0.8	0.42

Sono stati selezionati due casi, uno tra quelli che presentano condizioni di ventosità debole e uno tra quelli caratterizzati da presenza di vento forte. Per entrambi i gruppi, la scelta è ricaduta sullo scenario che porta la combustione ad emettere la concentrazione maggiore di anidride carbonica. Sono stati quindi selezionati i casi:

- Nottata stabile (caratterizzato da condizioni atmosferiche leggermente stabili e vento debole)
- Stabilità ambientale e presenza di vento forte

Per entrambi i casi viene fornito un confronto tra le concentrazioni di CO₂ registrate da piano di controllo posto a 5m, all'istante di tempo t pari a 60 secondi e 300 secondi.

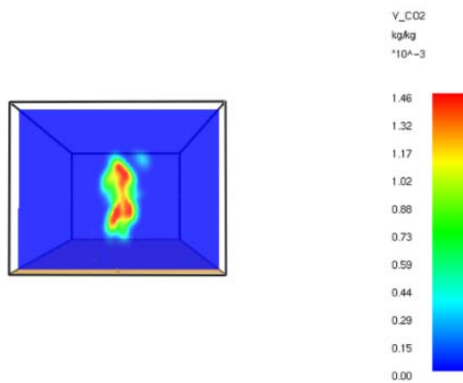


Fig. 5.86: distribuzione della concentrazione di anidride carbonica a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 5m dal fuoco ($X=12$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento debole ($v=1$ m/s)

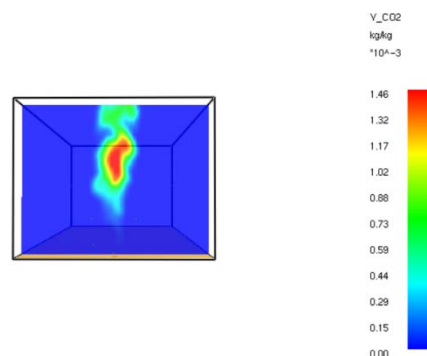


Fig. 5.87: distribuzione della concentrazione di anidride carbonica a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 5m dal fuoco ($X=12$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento debole ($v=1$ m/s)

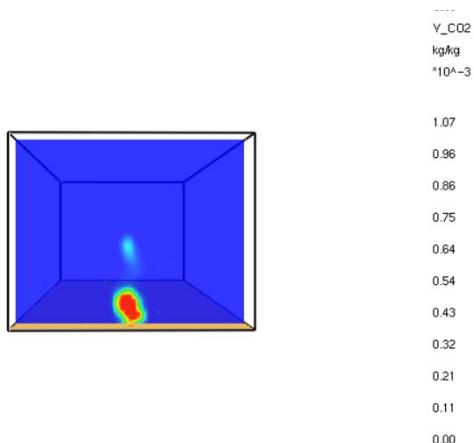


Fig. 5.88: distribuzione della concentrazione di anidride carbonica a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 5m dal fuoco ($X=12$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento forte ($v=4$ m/s)

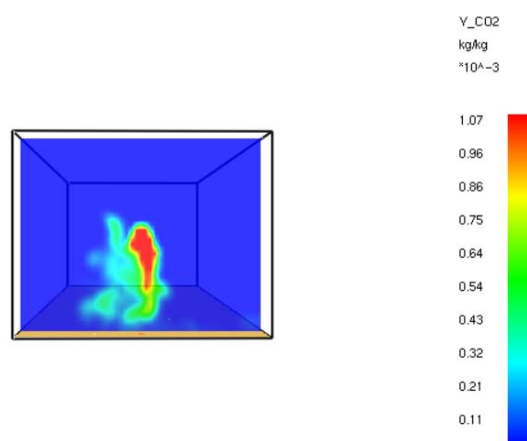


Fig. 5.89: distribuzione della concentrazione di anidride carbonica a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 5m dal fuoco ($X=12$), durante la combustione di polistirene in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento forte ($v=4$ m/s)

Osservando il confronto proposto dalle figure Fig. 5.86 – Fig. 5.89 si può notare che le concentrazioni rinvenute sono sullo stesso ordine di grandezza. Ciò che differenzia i due scenari è la quota a cui si posizionano i picchi di concentrazione, ossia, circa nella metà superiore del dominio nel caso di leggera stabilità e vento debole, nella metà inferiore nel caso, invece, delle condizioni leggermente stabili con presenza di vento forte.

Infine, si riporta anche un resoconto sulle concentrazioni di gas di combustione registrate nelle prove con superficie di combustione aumentata. Entrambe le prove sono state svolte in condizioni di estrema instabilità atmosferica e presenza di vento debole (1 m/s).

La tabella Tab. 5.22 riporta i valori relativi alla prova di combustione con *vent* pari a 5m x 5m.

La tabella Tab. 5.23 riporta invece i valori relativi alla prova eseguita con *vent* pari a 10m x 10m.

Tab. 5.22: concentrazioni (esprese in g/kg) di CO₂, CO e particolato, riscontrate su diversi piani di controllo, nel caso di combustione del polistirene in condizioni di estrema instabilità, vento debole e superficie di combustione pari a 5m x 5m

5m x 5m	Distanza dal fuoco			
	Sul fuoco	5 m	10 m	50 m
CO ₂	74.88	6.53	4.28	1.73
CO	1.66	0.145	0.09	-
particolato	4.53	0.39	0.26	0.023

Tab. 5.23: concentrazioni (esprese in g/kg) di CO₂, CO e particolato, riscontrate su diversi piani di controllo, nel caso di combustione del polistirene in condizioni di estrema instabilità, vento debole e superficie di combustione pari a 10m x 10m

10m x 10m	Distanza dal fuoco			
	Sul fuoco	5 m	10 m	50 m
CO ₂	137	13.53	7.67	2.56
CO	3.06	0.3	0.17	0.057
particolato	8.36	0.82	0.4674	0.049

Nelle figure seguenti si riporta un confronto ottenuto paragonando uno stesso piano di controllo in istanti diversi della combustione.

Confronto fra concentrazioni di monossido di carbonio a 10m dal fuoco, nei due casi considerati, all'istante t pari a 60 secondi e pari a 180 secondi. (§Fig. 5.90- Fig. 5.93)

Le Fig. 5.90 e Fig. 5.91 sono relative al *vent* di dimensioni paria 5m x 5m

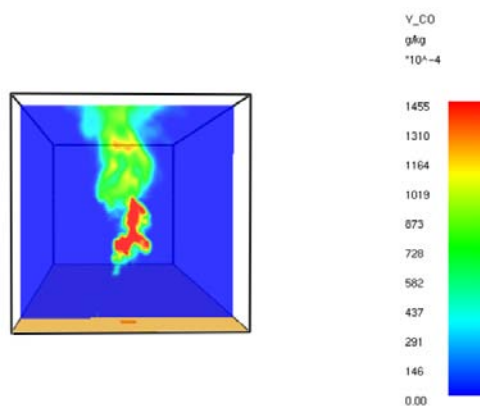


Fig. 5.90: distribuzione della concentrazione di monossido di carbonio a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 10m dal fuoco durante la combustione di polistirene in condizioni di forte instabilità ambientale e vento debole ($v=1$ m/s) con superficie di combustione pari a 5m x 5m

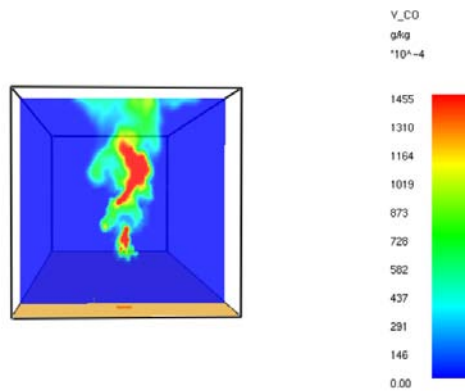


Fig. 5.91: distribuzione della concentrazione di monossido di carbonio a $t=180s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 10m dal fuoco durante la combustione di polistirene in condizioni di forte instabilità ambientale e vento debole ($v=1$ m/s) con superficie di combustione pari a $5m \times 5m$

Le Fig. 5.92 e Fig. 5.93 sono relative al vent di dimensioni pari a $10m \times 10m$.

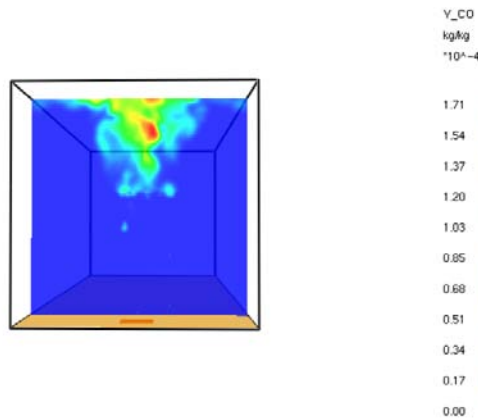


Fig. 5.92: distribuzione della concentrazione di monossido di carbonio a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 10m dal fuoco durante la combustione di polistirene in condizioni di forte instabilità ambientale e vento debole ($v=1$ m/s) con superficie di combustione pari a $10m \times 10m$

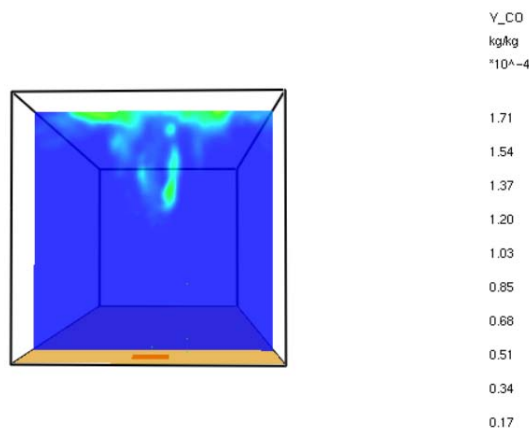


Fig. 5.93: distribuzione della concentrazione di monossido di carbonio a $t=180s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 10m dal fuoco durante la combustione di polistirene in condizioni di forte instabilità ambientale e vento debole ($v=1$ m/s) con superficie di combustione pari a $10m \times 10m$

5.4.3 Analisi termica

Analogamente agli altri materiali polimerici già visti nei precedenti paragrafi §5.2 (Polietilene) e §5.3 (Polipropilene), anche per il polistirene si sono indagati il comportamento termico dei gas di combustione e il flusso termico emesso.

Nel primo caso, si riscontra nuovamente analogia fra i casi di combustione in condizioni estremamente instabili con presenza di vento debole e leggermente instabili con presenza di vento.

Si riporta in Fig. 5.94 l'andamento della temperatura dei fumi registrato dalle sonde poste 5m a valle del fuoco.

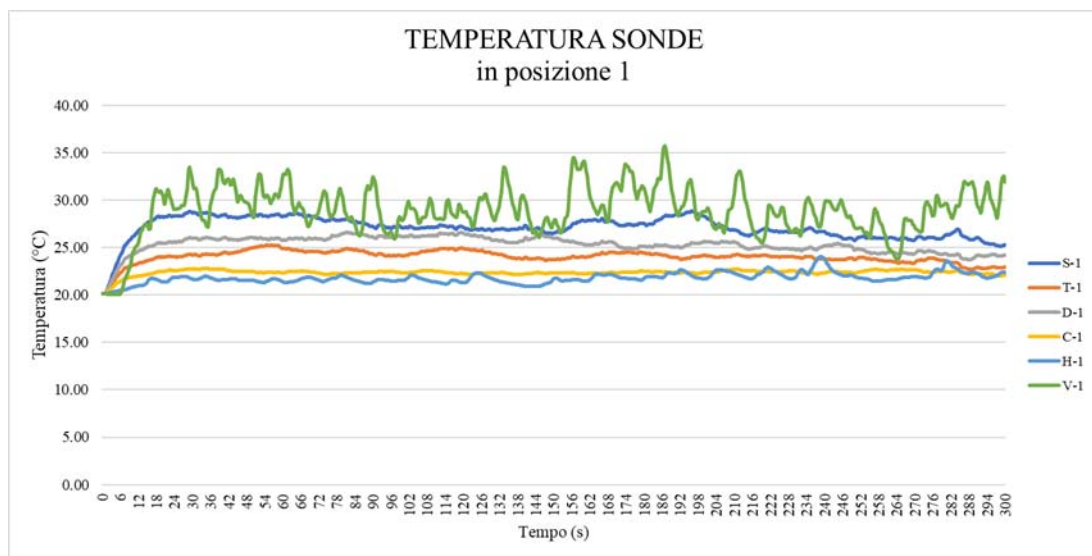


Figura 5.94: andamento della temperatura registrato, a varie altezze, dalle sonde poste 5m a valle e in asse con il fuoco, durante la combustione del polistirene in condizioni estremamente instabili e vento debole

L'andamento del grafico analogo, costruito sui dati registrati durante la combustione in condizioni leggermente stabili e con presenza di vento debole, si presenta simile a quello in Fig. 5.94.

Si riportano di seguito, in Tab. 5.23 e Tab. 5.24, i principali valori caratteristici registrati durante le prove dalle singole sonde.

Tab. 5.23: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polistirene in condizioni di forte instabilità e vento debole

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	20.13	20.13	20.13	20.12	20.12	20.07
T_{max}	28.84	25.32	25.28	22.79	24.05	35.75
Valore medio	27.09	26.62	24.03	22.36	21.79	29.96

Tab. 5.24: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polipropilene in condizioni di leggera stabilità e vento debole

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	19.96	19.96	19.96	19.96	19.96	19.96
T_{max}	28.44	26.55	24.79	22.57	25.35	37.75
Valore medio	26.77	25.12	23.60	22.04	22.32	30.13

I restanti casi contemplati nella casistica dei possibili scenari ambientali, sono accumulati a loro volta da un simile andamento delle temperature.

In Fig. 5.95 si riporta, a titolo esemplificativo, il grafico relativo l'andamento di temperatura dei fumi di combustione emessi durante la prova con polistirene in condizioni di leggera instabilità e presenza di vento forte.

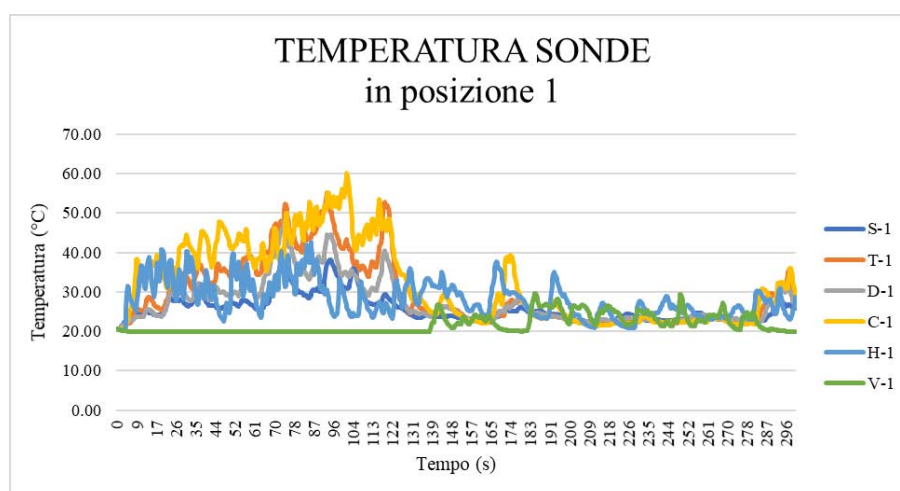


Figura 5.95: andamento della temperatura registrato, a varie altezze, dalle sonde poste 5m a valle e in asse con il fuoco nel caso di combustione del polistirene in condizioni di leggera instabilità e presenza di vento forte

La turbolenza dei fumi, dovuta alla presenza di vento forte, crea tutta una serie di oscillazioni irregolari nella rappresentazione grafica dell'andamento di temperatura.

I valori tendenzialmente più alti sono stati registrati dalla sonda posta 5 m a valle del fuoco, a quota 5 m. Segue, l'andamento di temperatura riportato dalla sonda T-1, posta nella stessa posizione a quota 3m.

Per completezza si riportano di seguito i valori di picco (massimi e minimi) registrati da ogni sonda nelle varie prove, svolte in diverse condizioni ambientali. In particolare, è possibile trovare i valori della prova avvenuta in condizioni di:

- Leggera instabilità e vento forte (Tab. 5.25)
- Condizioni neutre di stabilità atmosferica e presenza di vento forte (Tab. 5.26)
- Condizioni leggermente stabili e presenza di vento forte (Tab. 5.27)

Tab. 5.25: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polistirene in condizioni leggera instabilità ambientale e vento forte

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	20.59	20.57	20.55	20.51	20.33	19.94
T_{max}	38.14	48.14	55.13	59.99	42.66	29.67

Tab. 5.26: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polistirene in condizioni stabilità ambientale neutra e vento forte

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	20	20	20	20	20	20
T_{max}	37.10	44.35	48.46	50.47	48.59	30.69

Tab. 5.27: valori caratteristici di temperatura riscontrati, dalle sonde in posizione 1 collocate a varie altezze (m), durante la prova di combustione del polistirene in condizioni leggera stabilità ambientale e vento forte

	S	D	T	C	H	V
	1.5 m	2 m	3 m	5 m	10 m	20 m
T_{min}	19.41	19.41	19.41	19.41	19.41	19.41
T_{max}	43.80	49.68	54.49	57.37	42.04	30.39

Infine, riporta un confronto tra i vari HRRPUA ottenuti dai risultati. Si confrontano i valori di flusso termico registrati in corrispondenza del fuoco, a 3m e a 5m dal fuoco, nelle varie condizioni di stabilità ipotizzate.

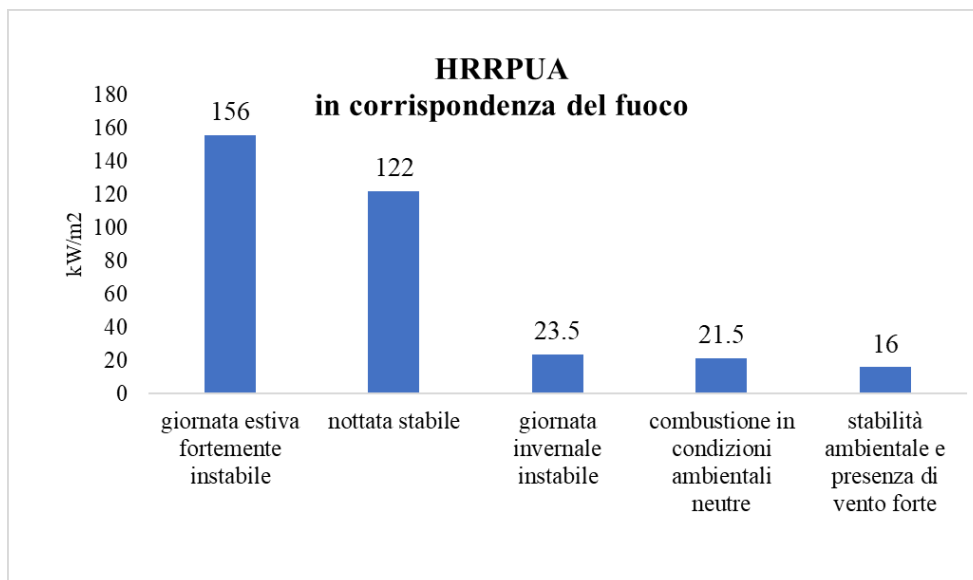


Figura 5.96: valori di HRRPUA registrati in corrispondenza del fuoco a seconda delle varie condizioni di prova

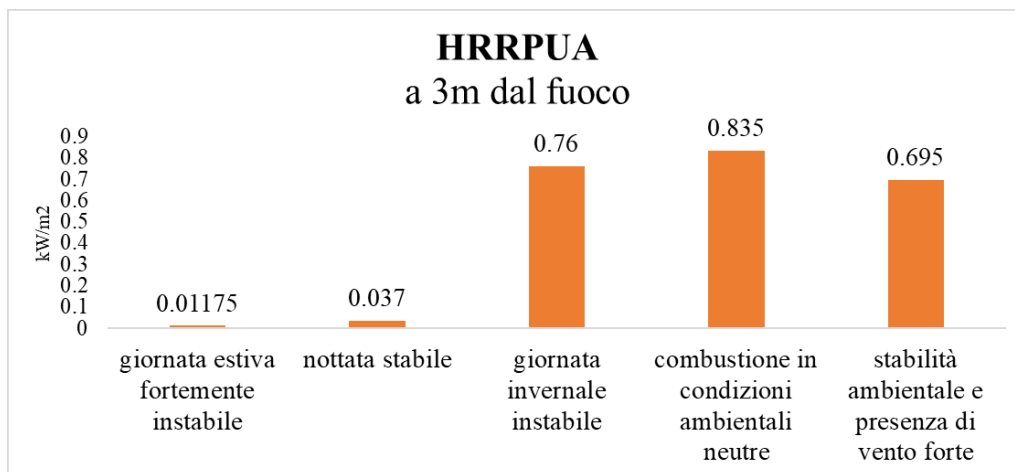


Figura 5.97: valori di HRRPUA registrati in a 3m dal fuoco a seconda delle varie condizioni di prova

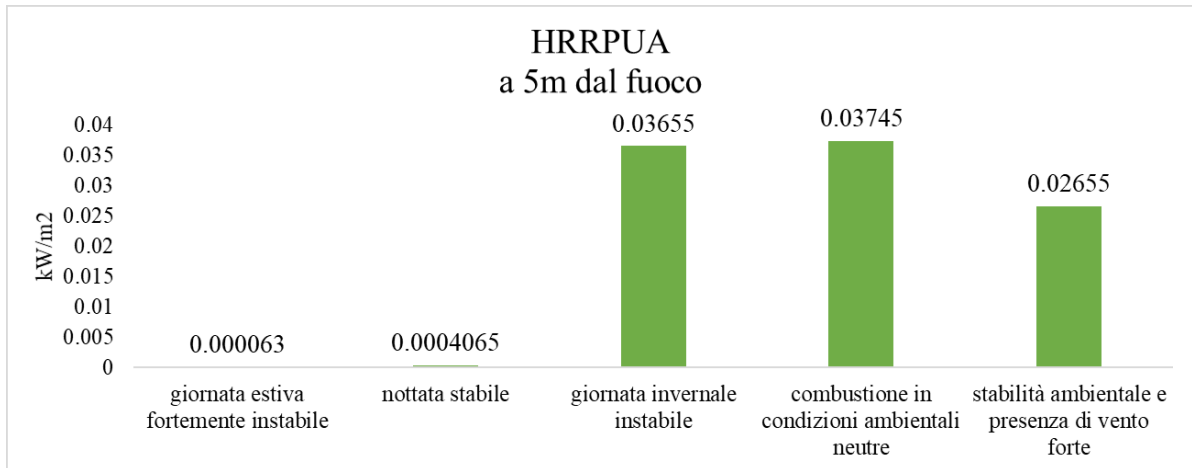


Figura 5.98: valori di HRRPUA registrati a 5m dal fuoco a seconda delle varie condizioni di prova

In riferimento ai valori di HRRPUA registrati a 3m e 5m non si rilevano condizioni di particolare criticità nei confronti di eventuali strutture adiacenti o persone che venissero a trovarsi nei pressi del fuoco alle suddette distanze.

Il valore di flusso termico per unità di area è stato misurato anche nel caso delle prove condotte con superficie di combustione aumentata. In corrispondenza del fuoco si sono rilevati valori pari a 19390 kW/m² nel caso di *vent* pari a 25 m² e pari a 47040 kW/m² nel caso del *vent* di dimensioni pari a 100 m².

5.5 Prove eseguite con polivinilcloruro

Nel presente paragrafo si riportano i risultati delle prove condotte utilizzando il polivinilcloruro come matrice omogenea soggetta a combustione.

In questo caso sono state condotte solo due prove considerando che la combustione possa avvenire ad esempio:

- In condizioni di estrema instabilità e vento debole
- In condizioni di leggera stabilità e vento debole

5.5.1 Analisi qualitativa dell'evoluzione del pennacchio dei fumi

I fumi di combustione del polivinilcloruro si generano copiosamente dalla superficie del *vent* e salgono verticalmente verso l'alto, ma già dopo il primo minuto di combustione tendono a ricadere all'interno del volume di controllo. Le Fig. 5.99 e Fig. 5.101 riportano l'evoluzione del pennacchio all'istante t pari a 60 secondi rispettivamente per le due prove sopracitate e, analogamente, le Fig. 5.100 e Fig. 5.102 riportano la situazione a 180 secondi.

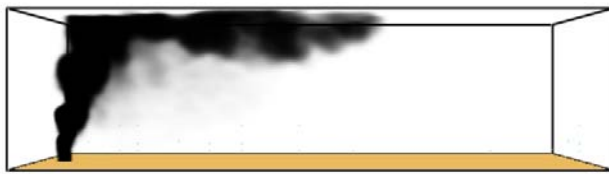


Fig. 5.99: evoluzione del pennacchio dei fumi nel caso di combustione del polivinilcloruro in condizioni di forte instabilità e vento debole, all'istante $t=60s$

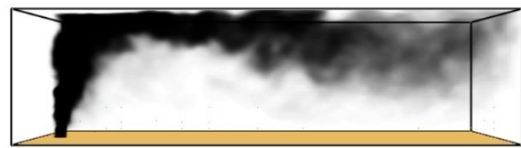


Fig. 5.100: evoluzione del pennacchio dei fumi nel caso di combustione del polivinilcloruro in condizioni di forte instabilità e vento debole, all'istante $t=300s$



Fig. 5.101: evoluzione del pennacchio dei fumi nel caso di combustione del polivinilcloruro in condizioni di leggera stabilità e vento debole, all'istante $t=60s$

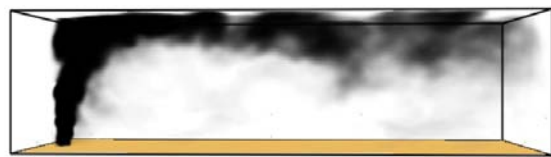


Fig. 5.102: evoluzione del pennacchio dei fumi nel caso di combustione del polivinilcloruro in condizioni di leggera stabilità e vento debole, all'istante $t=300s$

5.5.2 Analisi dei prodotti di combustione

Nelle due prove effettuate con matrice polivinilcloruro sono state ricercate concentrazioni di anidride carbonica, monossido di carbonio, particolato e acido cloridrico. Quest'ultimo in particolare rappresenta una novità rispetto alle matrici precedenti e necessita di particolare attenzione essendo un composto altamente tossico nei confronti dell'uomo.

Si riportano di seguito le tabelle con le concentrazioni rilevate sui piani di controllo posti in corrispondenza del fuoco e a 3m, 5m, 10m e 20m a valle. Per semplicità si rappresenta con:

- 1: la prova caratterizzata da condizioni di forte instabilità e vento debole
- 2: la prova caratterizzata da condizioni di leggera stabilità e vento debole

Tab. 5.28: valori massimi di concentrazione di anidride carbonica registrati su piani di controllo posti a varie distanze dal fuoco durante la combustione di polivinilcloruro

Concentrazione di CO₂ [g/kg]	Distanza dal fuoco				
	Sul fuoco	3 m	5 m	10 m	20 m
1	10.98	1.86	1.19	0.65	0.27
2	9.56	2.11	1.23	0.71	0.34

Tab. 5.29: valori massimi di concentrazione di monossido di carbonio registrati su piani di controllo posti a varie distanze dal fuoco durante la combustione di polivinilcloruro

Concentrazione di CO [g/kg]	Distanza dal fuoco				
	Sul fuoco	3 m	5 m	10 m	20 m
1	1.02	0.17	0.11	0.167	-
2	0.88	0.19	0.11	0.066	

Tab. 5.30: valori massimi di concentrazione di particolato registrati su piani di controllo posti a varie distanze dal fuoco durante la combustione di polivinilcloruro

Concentrazione di particolato [g/kg]	Distanza dal fuoco				
	Sul fuoco	3 m	5 m	10 m	20 m
1	2.8	0.47	0.30	0.16	0.069
2	2.47	0.54	0.31	0.18	0.087

Tab. 5.31: valori massimi di concentrazione di acido cloridrico registrati su piani di controllo posti a varie distanze dal fuoco durante la combustione di polivinilcloruro

Concentrazione di acido cloridrico [g/kg]	Distanza dal fuoco				
	Sul fuoco	3 m	5 m	10 m	20 m
1	9.47	1.6	1.028	0.56	0.23
2	8.25	1.82	1.06	0.617	0.29

Le seguenti figure rappresentano un confronto tra le concentrazioni di acido cloridrico registrate su piani di controllo posti a distanza pari a 3m dal fuoco (Fig. 5.103 e Fig. 5.104) e a distanza 5m (Fig. 5.105 e Fig. 5.106). Le immagini poste a sinistra rappresentano la configurazione dopo 60 secondi di combustione, quella a destra dopo 300 secondi.

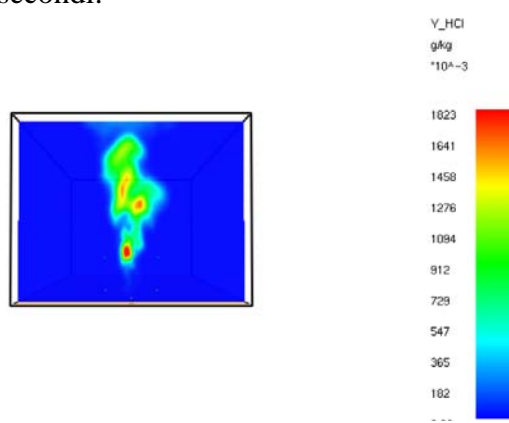
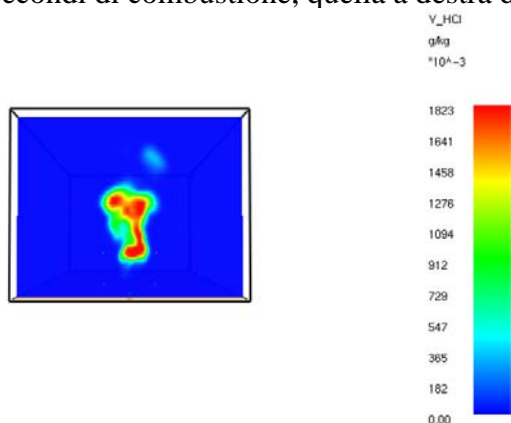


Fig. 5.103: distribuzione della concentrazione di acido cloridrico a $t=60s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco durante la combustione di polivinilcloruro in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento debole ($v=1$ m/s)

Fig. 5.104: distribuzione della concentrazione di acido cloridrico a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 3m dal fuoco durante la combustione di polivinilcloruro in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento debole ($v=1$ m/s)

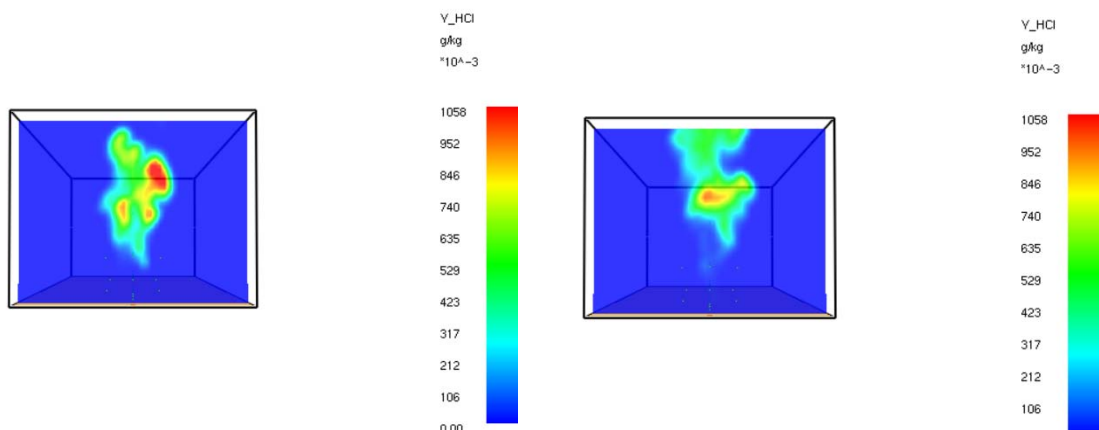


Fig. 5.105: distribuzione della concentrazione di acido cloridrico a $t=30s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 5m dal fuoco durante la combustione di polivinilcloruro in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento debole ($v=1\text{ m/s}$)

Fig. 5.106: distribuzione della concentrazione di acido cloridrico a $t=300s$, registrata dal piano di controllo a distanza di 5m dal fuoco durante la combustione di polivinilcloruro in condizioni di leggera stabilità ambientale e vento debole ($v=1\text{ m/s}$)

5.5.3 Analisi termica

Sono stati elaborati i dati ottenuti dalle sonde poste in posizione 1, ossia 5m a valle in asse con il fuoco. In entrambi i casi, l'andamento è risultato simile. Pertanto, si riporta a titolo esemplificativo il grafico delle temperature della prova di combustione in condizioni di leggera stabilità e presenza di vento debole. (§Fig. 5.107)

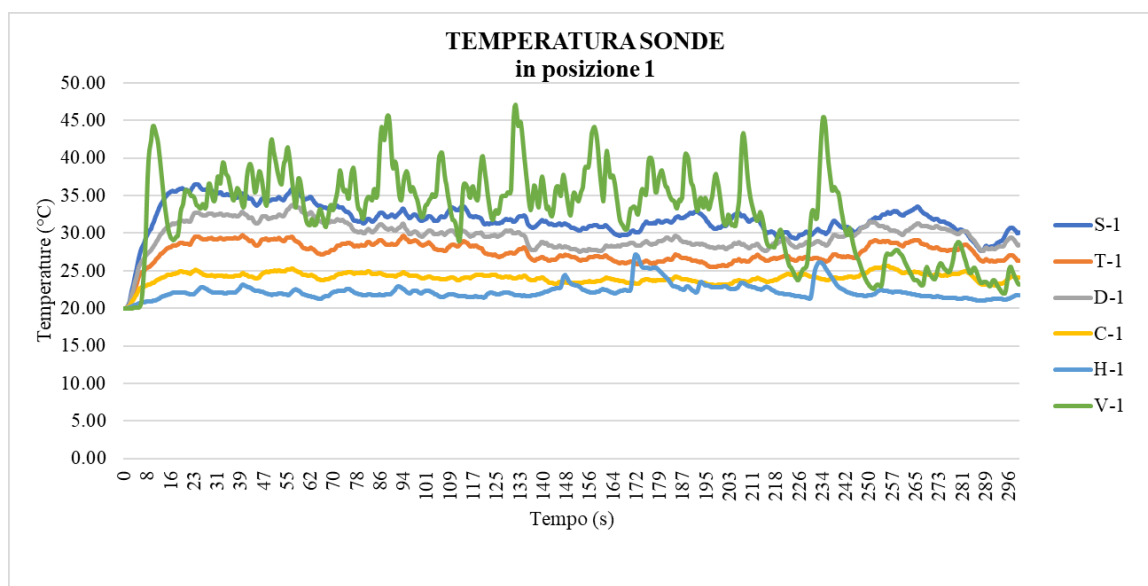


Figura 5.107: andamento della temperatura registrato, a varie altezze, dalle sonde poste 5m a valle e in asse con il fuoco nel caso di combustione del polivinilcloruro, in condizioni di leggera stabilità e presenza di vento debole

Inoltre, si riporta un prospetto del dominio nel quale è raffigurato un piano di controllo della temperatura, passante per il fuoco e coincidente con l'asse principale di sviluppo del volume.

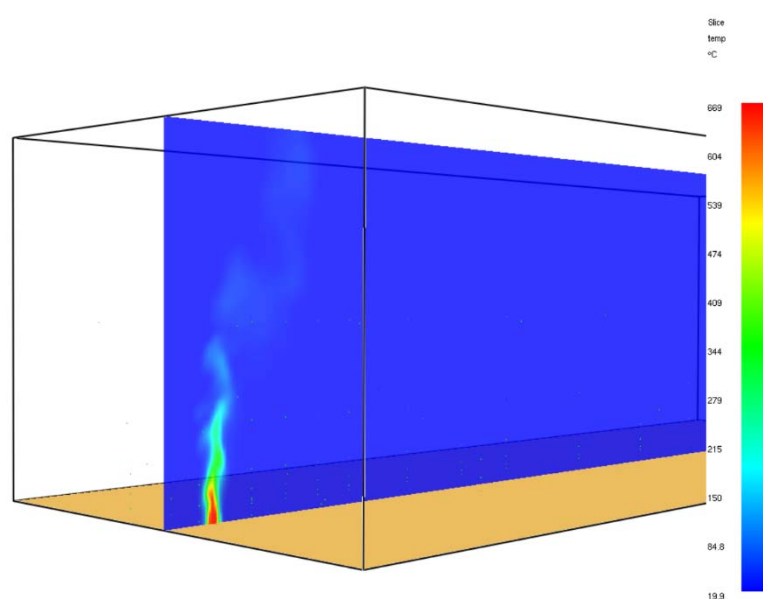


Fig. 5.108: prospetto del dominio con piano di controllo della temperatura a 10 s dall'inizio della combustione di polivinilcloruro in condizioni di leggera stabilità e vento debole

La temperatura massima registrata in corrispondenza del fuoco ha valore 669 °C nel caso della combustione in condizioni di leggera stabilità e vento debole. Nel caso di combustione considerato in condizioni di estrema instabilità e vento debole, la temperatura massima raggiunta vale 682°C.

Inoltre, dai valori di HRRPUV sono stati ricavati i valori di flusso termico per unità di superficie.

5.6 Analisi comparativa dei risultati

Alla luce dei risultati ottenuti nelle simulazioni, effettuate in diverse condizioni di prova, si riportano delle brevi considerazioni di carattere generale.

Innanzitutto, è stata ampiamente confermata l'ipotesi che i fattori ambientali abbiano un'influenza non trascurabile nella determinazione dello scenario di incendio. Le condizioni di maggiore criticità sono emerse in relazione alle ipotesi fissate di presenza di vento forte. La ventilazione sparge la nube dei fumi di combustione in tutto il dominio. Se da una parte, vicino al fuoco si ha una riduzione delle concentrazioni di contaminanti, dovuta alla diluizione dei fumi, dall'altra a valle del fuoco si ha un corrispondente aumento delle stesse concentrazioni di inquinanti, tutto questo riferito relativamente alle analoghe prove di combustione che avvengano però in condizioni di ventilazione debole.

In presenza di vento forte non solo la nube di contaminanti è trasportata per una distanza maggiore, ma viene anche mantenuta ad una quota molto bassa e adiacente al suolo. Ciò è da tenere in forte considerazione in relazione all'eventuale presenza di occupanti.

Per quanto riguarda le concentrazioni di inquinanti confrontando i vari materiali emerge quanto segue.

In analoghe condizioni ambientali, il materiale che produce le maggiori concentrazioni di anidride carbonica e il polietilene. Seguono, in ordine decrescente di contribuzione alle emissioni di CO₂ polipropilene e polistirene. (§Fig. 5.109 – Fig. 5.111)

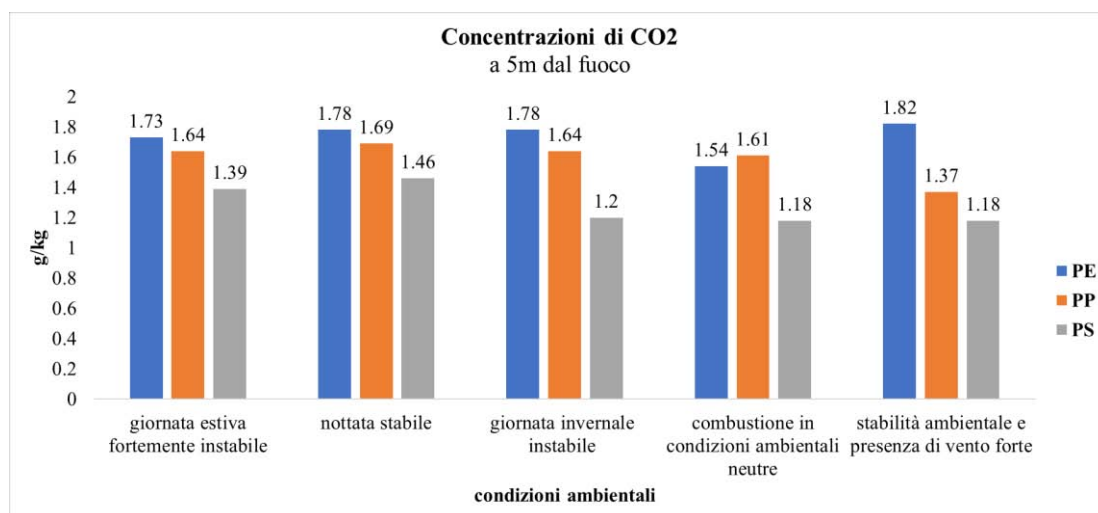


Fig. 5.109: comparazione tra specie diverse dei picchi di concentrazione di anidride carbonica rilevati sul piano a 5 m dal fuoco

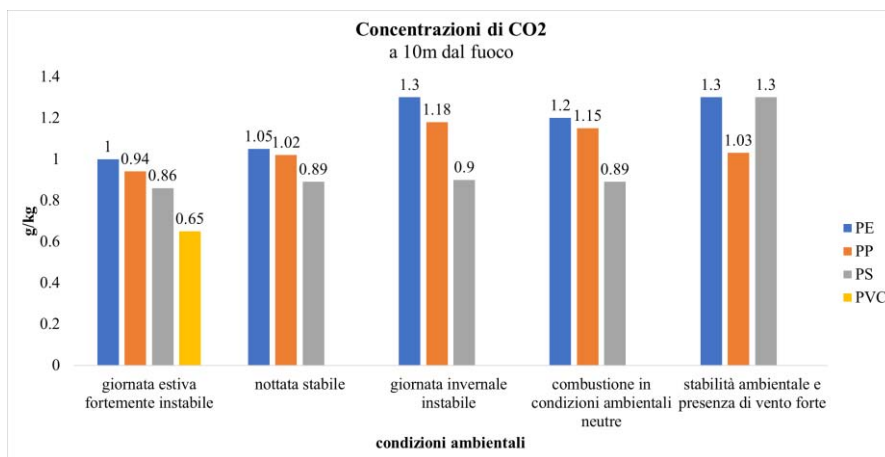


Fig. 5.110: comparazione tra specie diverse dei picchi di concentrazione di anidride carbonica rilevati sul piano posto a 10 m dal fuoco

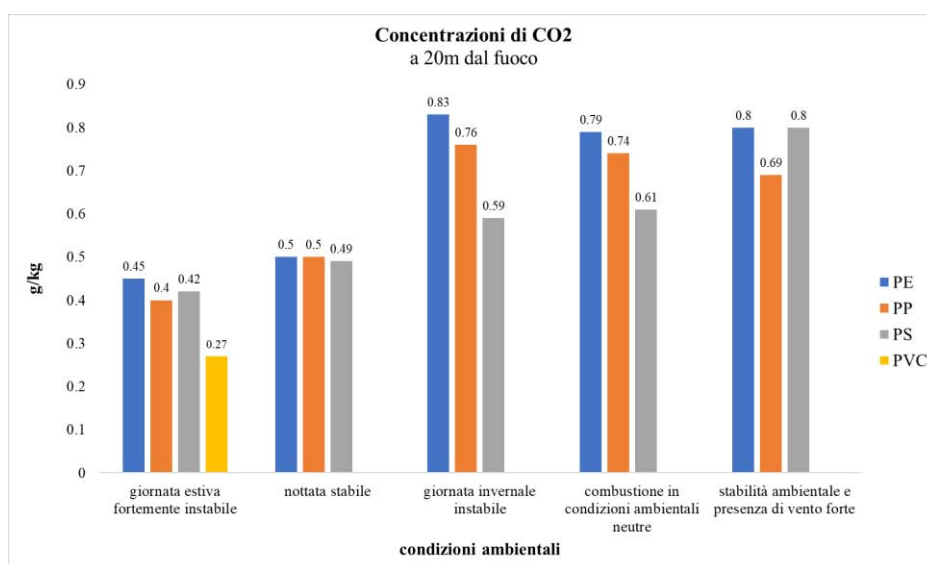


Fig. 5.111: comparazione tra specie diverse dei picchi di concentrazione di anidride carbonica rilevati sul piano posto a 20 m dal fuoco

Considerando invece gli apporti di CO, rilevati tra i gas di combustione, il maggiore responsabile appare essere il polivinilcloruro, che stacca notevolmente le concentrazioni di monossido di carbonio emesse dagli altri materiali plastici polimerici.

Togliendo il PVC, unico polimero clorurato, tra i restanti materiali il polistirene è il materiale che produce emissioni di CO in concentrazioni lievemente maggiori rispetto a polietilene e polipropilene. Nel grafico in Fig. 5.113 i valori segnalati con '0' non sono nulli ma il dato non è disponibile.

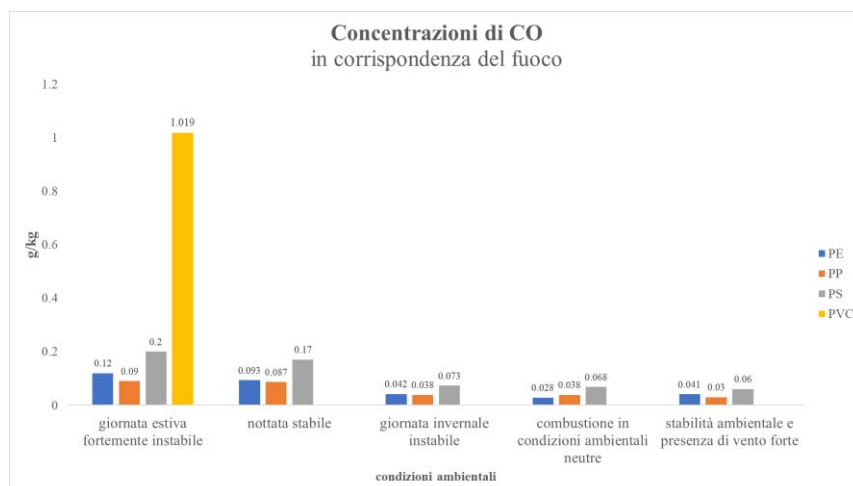


Fig. 5.112: comparazione tra specie diverse dei picchi di concentrazione di monossido di carbonio rilevati sul piano posto in corrispondenza del fuoco

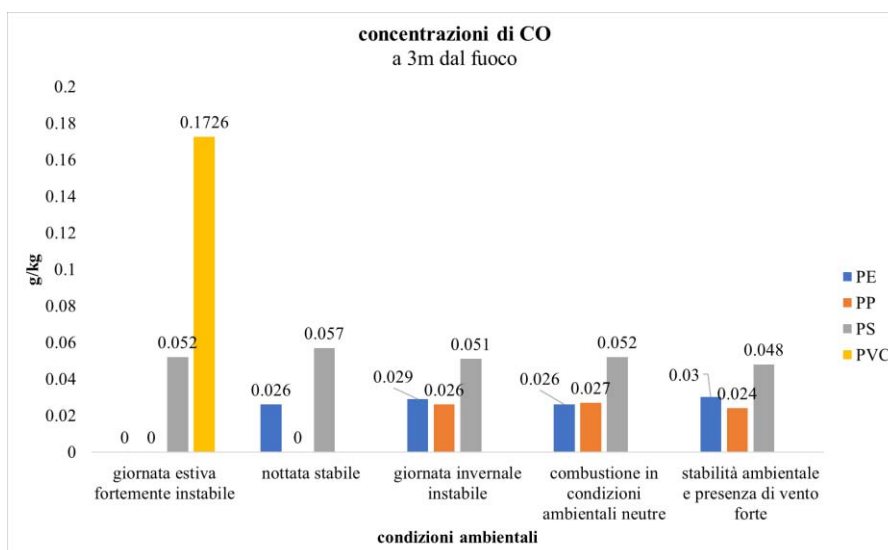


Fig. 5.113: comparazione tra specie diverse dei picchi di concentrazione di monossido di carbonio rilevati sul piano posto a 3 m dal fuoco

Analizzando il confronto tra i contributi dei vari materiali in termini di concentrazioni di particolato spicca nuovamente il polivinilcloruro. A seguire, tra i materiali plastici non clorurati, il polistirene è tendenzialmente il materiale che produce concentrazioni di particolato leggermente superiori rispetto a polietilene e polistirene.

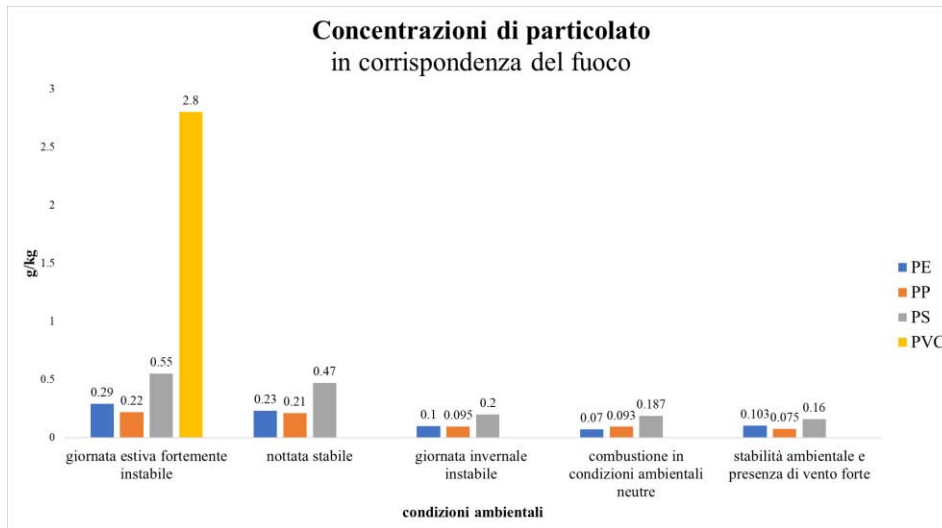


Fig. 5.114: comparazione tra specie diverse dei picchi di concentrazione di particolato rilevati sul piano posto in corrispondenza del fuoco

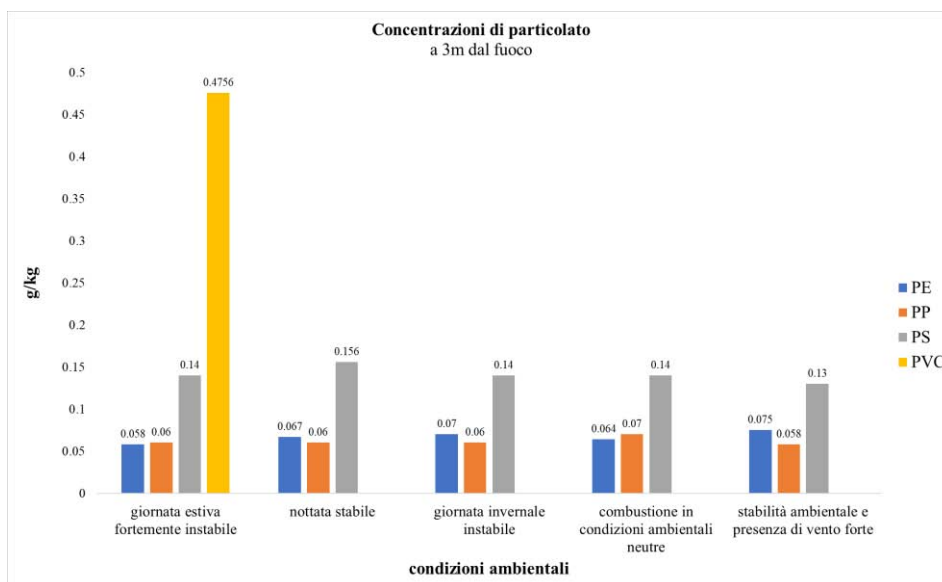


Fig. 5.115: comparazione tra specie diverse dei picchi di concentrazione di particolato rilevati sul piano posto a 3m dal fuoco

Infine, alcune brevissime considerazioni sul comportamento termico dei materiali.

In generale, dal confronto delle prove effettuate si evince che le temperature maggiori raggiunte dai fumi di combustione sono rilevate nelle simulazioni che vedono la presenza di vento forte. Nelle stesse simulazioni, le sonde riportano un andamento di temperatura caratterizzato da frequenti oscillazioni di natura irregolare. Questo comportamento è dovuto anche ad un aspetto legato al funzionamento del software di calcolo e al metodo con cui questo svolge il calcolo. Nelle fasce di dominio dove questo andamento si accentua, sarebbe opportuno raffinare ulteriormente la *mesh* per poter avere una restituzione più accurata dei profili. Ciò non avrebbe alcuna ripercussione sul valore medio della temperatura, poiché si sta lavorando in regime di *non-sensitivity*.

Comparando infine i valori di rilascio termico per unità di superficie in corrispondenza del fuoco non si identifica un comportamento prevalente netto, ma sembra che l'entità del valore risenta delle condizioni atmosferiche.

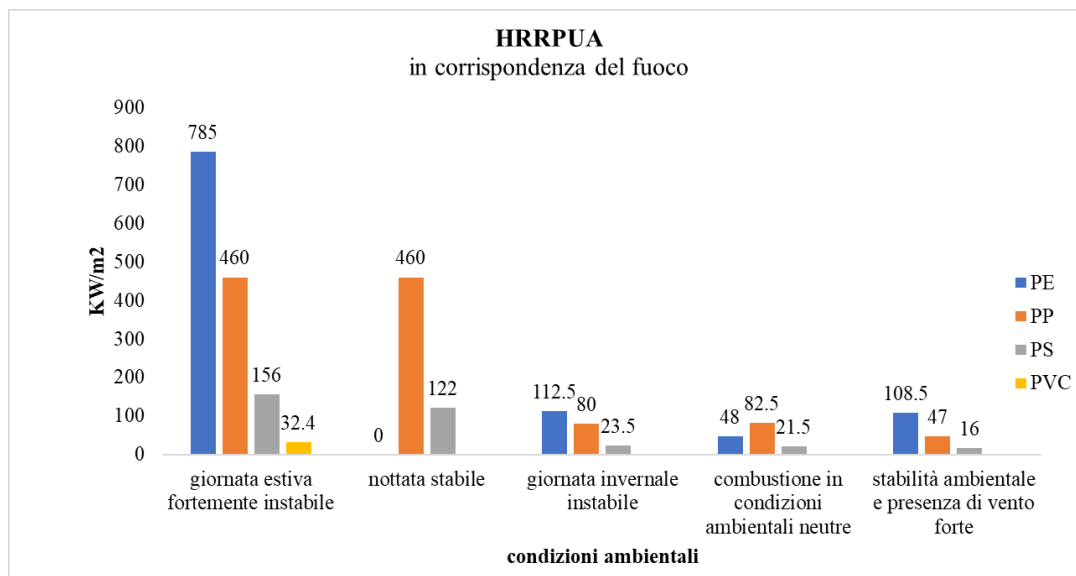


Fig. 5.116: comparazione tra specie diverse dei valori di HRRPUA misurati in corrispondenza del fuoco

Diversamente invece, a 3 m dal fuoco, sembra che nelle condizioni di vento sostenuto il polietilene sia il materiale che emette energia termica maggiore durante la combustione, seguito in modo via via decrescente da polipropilene e polistirene.

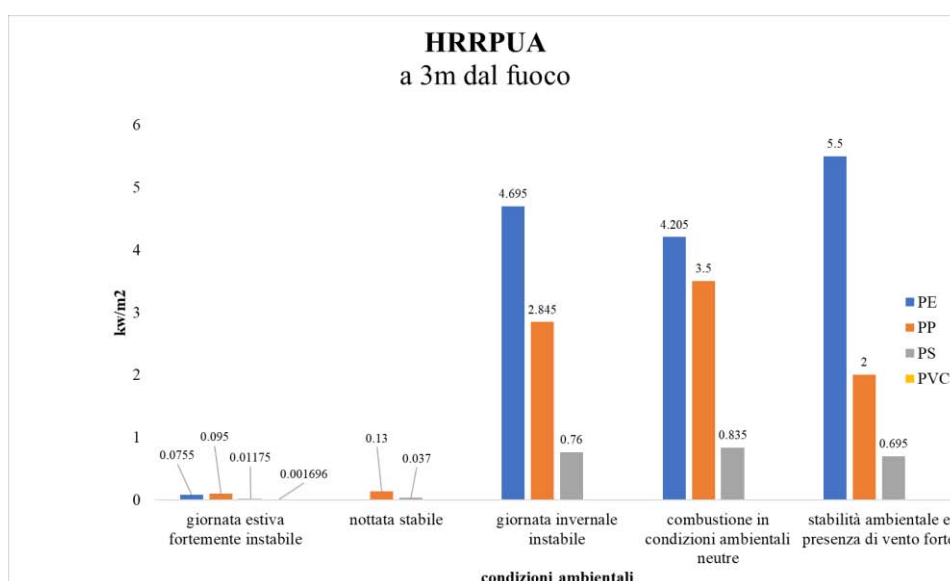


Fig. 5.117: comparazione tra specie diverse dei valori di HRRPUA misurati a 3m dal fuoco

Conclusioni

Il presente studio ha riguardato la simulazione su scala reale e in campo aperto di scenari che coinvolgono incendi di matrici plastiche di rifiuti. Lo scopo principale è stato quello di proporre un approccio strutturato alla modellazione del termine sorgente e della relativa dispersione in ambiente non confinato. A tale scopo è stato fatto uso del software di fluidodinamica computazionale FDS, mediante il quale è stato implementato l'aspetto riguardante la chimica dell'incendio, l'effetto termico e la dispersione atmosferica di inquinanti selezionati.

Ai fini della conduzione delle prove sono state considerate le principali matrici polimeriche comunemente rivenute nei siti di deposito e stoccaggio. Si tratta di materiale plastico polimerico e in particolare di: polietilene, polipropilene e polistirene. Si è ritenuto opportuno effettuare delle simulazioni anche con il PVC (polivinilcloruro) un materiale plastico polimerico che, diversamente dai precedenti, contiene al suo interno anche atomi di cloro.

Ogni simulazione è stata condotta in diverse condizioni di stabilità atmosferica e in presenza di vento.

Confrontando i risultati ottenuti dai differenti scenari è stata riconfermata l'importanza di considerare condizioni ambientali diverse, poiché si è visto come influenzino fortemente la combustione e la dispersione dei fumi. Particolare criticità è stata evidenziata nei casi caratterizzati da forte ventosità, la quale veicola a maggiore distanza le sostanze inquinanti e le mantiene a quote molto basse.

Nei casi di combustione è stata ricercata la presenza di anidride carbonica, monossido di carbonio e particolato. Le concentrazioni maggiori di CO₂ sono imputabili alla combustione del polietilene. Escluso il polivinilcloruro, il polistirene è la matrice che bruciando dà concentrazioni maggiori di monossido di carbonio e particolato. La combustione del polivinilcloruro comporta l'emissione di alte concentrazioni di monossido di carbonio e particolato, ma anche concentrazioni non trascurabili di acido cloridrico. Quest'ultimo è stato rinvenuto nel dominio fino ad una distanza di 20m dal fuoco. Il software è stato in grado di restituire un valore di concentrazione su piani di controllo fino ad una distanza massima dal fuoco pari a 10m nel caso di CO e particolato, fino a 40m nel caso delle concentrazioni di anidride carbonica. In corrispondenza e a 3m dal fuoco, il polietilene ha dimostrato avere tendenzialmente i valori maggiori di rilascio termico per unità di area, a prescindere dalle condizioni ambientali in cui si è svolta la prova.

Per migliorare l'accuratezza del calcolo sarebbe necessario infittire ulteriormente la *mesh* in alcuni punti del dominio, ma si è scelto di limitare la zona di maggior raffinatezza al volume adiacente al fuoco per non rendere la simulazione eccessivamente gravosa.

Infine, si ritiene utile per eventuali sviluppi futuri poter implementare i dati di letteratura con dati raccolti da prove sperimentali.

Riferimenti bibliografici

1. Ufficio Normazione ordinamentale e tecnica, collegamento beni culturali, referente sicurezza e statistica. Coordinamento Dir. Arch. Valter Cirillo. *Annuario statistico del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco*. Periodo di riferimento: 01/01/2017 -31/12/2017, dati aggiornati al 13/03/2018.
2. PlasticsEurope (Association of Plastics Manufacturers) - PlasticsEurope Market Research Group (PEMRG) e Conversio Market & Strategy GmbH. *'Plastics – The facts 2018. An analysis of European plastics production, demand and waste data'*.
3. Servizio Interdipartimentale per le Emergenze Ambientali, Settore Studi e Valutazione (APAT), *'Diossine furani e PCB'*, nell'ambito del 'Progetto Diossina', Coord. Ing. R. Mussapi (2006)
4. ARPA Piemonte, *'Microinquinanti nell'ambiente'*, scheda illustrativa (2014).
5. Antincendio Italia, *'Il fumo e i suoi veleni'*, articolo 7 giugno 2017
6. Arpa Piemonte. *Glossario generale di Arpa Piemonte – Biomagnificazione* (ultimo accesso 21/03/2020)
7. ECHA -European Chemical Agency. *Pops. Comprensione dei pops*.
8. I.M. Forte, P. Indovina, A. Costa, C.A. Ianuzzi, L. Costanzo, A. Marfella, S. Montagnaro, G. Botti, E. Bucci, A. Giordano, *'Blood screening for heavy metals and organic pollutants in cancer patients exposed to toxic waste in southern Italy: A pilot study'* - Journal of Cellular Physiology – Novembre 2019
9. ISPRA, (2019). *Rapporto Rifiuti Urbani. Dati di sintesi*. Rapporti 314/2019.
10. Dati forniti da O.R.So – Osservatorio sovregionale, *Rapporto di rifiuti urbani*. Ed. 2018, a cura di ARPAV.
11. L. Gobbi, C. Terrabujo, L. Franz, L. Bergamin *et Al.*, (2018), *Rapporto rifiuti urbani. Produzione e Gestione 2017*. ARPAV
12. ISPRA, (2019). *Rapporto Rifiuti Speciali. Dati di sintesi*. Rapporti 311/2019
13. ARPAV - Osservatorio Regionale Rifiuti (2019). *Rapporto rifiuti speciali*.
14. Conai, Corepla, Consorzio Italiano Compostatori, Assobioplastiche. *Economia Circolare*. Nell'ambito del progetto "Dicheplastica6".
15. Corepla, (2019). *Relazione sulla gestione 2018*.
16. Lucia Rigamonti e Mario Grosso, *Riciclo dei rifiuti. Analisi del ciclo di vita dei materiali da imballaggio*, Dario Flaccovio Ed., 2009 – Cap. 3.7 *'La produzione primaria e secondaria dei materiali di imballaggio. La plastica'*
17. Istituto Cooperativo per l'innovazione, Consorzio Integra, Ideal Service. *Economia Circolare. Studio di fattibilità nell'ambito dell'economia circolare mirato al riciclo delle plastiche miste*. Studio promosso dal Ministero dello Sviluppo Economico. Redazione del documento a cura di Ing. Virginia Racioppi, Ing. A. Giorgio.

18. M. Hurley (ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*.
 - a. A. Witkowski et Al., *Thermal Decomposition of Polymeric Materials. Behaviour of Individual Polymers*, Cap. 7.
 - b. Brian F. Gray. *Spontaneous Combustion and Self-Heating*, Cap. 20
 - c. Jean-Marc Franssen, N. Iwankiw. *Structural Fire Engineering of Building Assemblies and Frames*, Cap. 52
 - d. V. Babrauskas. *Heat Release Heat*, Cap. 26
 - e. Appendix III - Fuel properties and Combustion Data, Tab. A.36: *Thermal properties and thermal response parameter values of polymers*, p. 3456.
 - f. Y. Hasemi, *Surface Flame Spread*, Fig. 23.2 'Change of the mode of surface flame spread according to the slope angle', Cap 23
19. International Labour Organization – International Chemical Safety Cards ICSCs
20. Enviroinex -Innovative Sustainable Solutions. *Pvc and fire*. Tabella: 'Ignition temperatures for various Materials (ASTM 1929).
21. Valdir Pignatta Silva, *Computational tool for the reinforced concrete columns fire design*. (ResearchGate)
22. DM 03/08/2015 – All. I, Sezione M.2, *Scenari di incendio per la progettazione prestazionale*
23. Dipartimento dei Vigili del fuoco, del Soccorso pubblico e della Difesa civile – Direzione centrale per la prevenzione e la sicurezza tecnica. *Esercitazione operativa dei vigili del fuoco con prove di spegnimento di incendi presso la Scuola di Formazione Operativa di Montelibretti*'.
24. K. McGrattan et Al, Fire Dynamics Simulator User's Guide. *Combustion*. Cap. 16.
25. Charles A. Harper, *Handbook of Building Materials for Fire Protection*. Tab 2.6 e Tab. 2.7
26. AtlaEolico, RSE, Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova. *Atlante Eolico dell'Italia. Mappa della velocità media annua del vento a 25 m s.l.t./s.l.m*
27. D. Bovolenta, *Studio dell'influenza della classe di stabilità atmosferica sulla dispersione di gas densi in ambienti con ostacoli* – Politecnico di Milano.
28. G. Bonafè, ARPA. *Meteorologia dello strato limite atmosferico* (presentazione 05/04/2006).
29. K. McGrattan et Al, Fire Dynamics Simulator User's Guide. *Atmospheric Effects and Wind*. Cap. 13
30. Comando provinciale dei VVF Reggio Calabria, presentazione a cura del Direttore Vice Dirigente Ing. Emilio Collini – *Corso base di specializzazione di prevenzione incendi*
31. Andrea Trevisan (2014). *I rischi da agenti chimici, fisici e biologici*. Terza ed.
32. Corso di Medicina del lavoro per Ingegneria della sicurezza civile e industriale, *Inquinanti aeordispersi*. Lezione a cura del Prof. Andrea Trevisan (Università di Padova)
33. Corso di dismissione dei siti industriali e gestione dei rifiuti, *'Principi fondamentali del rischio chimico e principali sostanze pericolose presenti nei siti industriali'* (Università di Ferrara)

34. IFA: Institute for Occupational Safety Health of the German Social Accident Insurance
35. Giorgio Cattani e Giuseppe Viviano, report *'Stazione di rilevamento dell'Istituto Superiore di Sanità per lo studio della qualità dell'aria: anni 2003 e 2004'* - (Rapporti ISTISAN 06/13)
Dipartimento di Ambiente e Connessa Prevenzione Primaria
36. McGrattan et Al. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*. NIST