

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

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

Tesi di Laurea Magistrale

Problematica degli incendi negli impianti di gestione rifiuti: contesto normativo e proposte di simulazione a confronto



Relatori

prof. Marmo Luca

prof. Carpignano Andrea

ing. Basso Barbara

Candidato

Puliga Rosa

Novembre 2022

A mia nonna

Indice

1. Introduzione	1
2. La problematica dei rifiuti e degli incendi ad essi correlati: inquadramento normativo e informazioni quantitative	5
2.1 Classificazione dei rifiuti	7
2.2 Dati sulla produzione dei rifiuti e focus sulla regione Piemonte	10
2.2.1 Rifiuti urbani	11
2.2.1 Rifiuti speciali	13
2.3 Adempimenti normativi per i gestori di rifiuti	16
2.3.1 Circolare Marzo 2018	17
2.3.2 Legge 132/2018	18
2.3.2.1 Confronto con Seveso	20
2.3.3 Circolare 2019 e DPCM 27 Agosto 2021	21
2.3.4 Normativa di prevenzione incendi	22
2.3.5 Normativa autorizzativa ambientale	24
2.3.5.1 Autorizzazione Integrata Ambientale	24
2.3.5.2 Procedura Ordinaria	26
2.3.5.3 Procedura semplificata	27
2.3.5.4 Valutazione di Impatto Ambientale	27
2.4 Considerazioni ulteriori	28
3. Attività di Arpa Piemonte in materia di impianti di gestione rifiuti, relazioni tecniche e strumentazioni per la verifica della qualità dell'aria	29
3.1 Ruolo di Arpa in materia di rifiuti	29
3.2 Banca dati e attività di Arpa in riferimento ad incendi negli impianti di gestione dei rifiuti	30
3.2.1 Fase preventiva	32
3.2.2 Fase operativa dell'emergenza incendi	32
3.2.3 Fase post-operativa dell'emergenza incendi	32
3.3 Strumentazione	33
3.3.1 Rilevatore multigas	34
3.3.2 Fiale colorimetriche a lettura diretta	35
3.3.3 Campionatori canister	37
3.3.4 Campionatore ad alto volume Echo-Puf	38
3.3.5 Piattaforma mobile	39

3.4 Casi di incendi occorsi	40
3.4.1 Stabilimento 1	40
3.4.2 Stabilimento 2	46
3.5 Considerazioni ulteriori	49
4. Fenomenologia degli incendi e presentazione dei programmi utilizzati	51
4.1 Fenomenologia dell'incendio	52
4.2 Combustione di materiali solidi	58
4.2.1 Sostanze pirolizzanti e non pirolizzanti	59
4.3 Combustione di sostanze liquide e pool fire	60
4.3.1 Considerazioni sulla velocità massica di combustione	62
4.3.2 Influenza del vento sulla velocità massica di combustione per unità di superficie associata a un pool fire	64
4.4 Introduzione al Phast	65
4.5 I pool fire in Phast	67
4.6 Presentazione del modello implementato su Excel con le relative equazioni	68
4.6.1 Potenza emessa \dot{Q}	69
4.6.2 Velocità massica di combustione	70
4.6.3 Altezza raggiunta dalle fiamme	71
4.6.4 Temperatura	72
4.6.5 Area	73
4.7 Considerazioni conclusive al capitolo	74
5. Simulazioni, confronti e conclusioni	75
5.1 Analisi delle grandezze in output nei due modelli	75
5.2 Confronto tra i modelli Phast ed Excel	76
5.2.1 Commento ai risultati	77
5.2.2 Considerazioni sulla temperatura associate alla natura turbolenta del fenomeno	78
5.3 Considerazioni sul calcolo dell'altezza delle fiamme	79
5.4 Confronto tra combustibili di natura fisica differente: metanolo e polivinilcloruro	80
5.5 Simulazioni con diverse tipologie di materiali	85
5.5.1 Commento ai risultati	86
5.5.2 Considerazioni sul calcolo della temperatura	91
5.6 Proposta di un modello sorgente alternativo da implementarsi sul	

software Phast: “Incendio di cumulo”	92
5.6.1 Database	92
5.6.2 Dati di input	93
5.6.3 Dati di output	93
5.7 Conclusioni	94
6. Figure	97
7. Tabelle	99
8. Equazioni e formule	100
9. Riferimenti bibliografici	101
10. Appendice	105
11. Ringraziamenti	111

1. Introduzione

La problematica degli incendi negli impianti di gestione rifiuti ha raggiunto una portata tale da suscitare l'attenzione non solo di coloro che operano nel settore, ma in generale di tutta la realtà italiana. Questo interessamento si è concretamente tradotto attraverso due eventi:

- il primo è l'interessamento della “*Commissione Parlamentare di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti e su illeciti ambientali ad esse correlati*” (Commissione parlamentare di inchiesta, 2021), la quale ha approvato e pubblicato il 4 agosto 2021 la Relazione sull'evoluzione del fenomeno degli incendi negli impianti di gestione dei rifiuti, che trae spunto dall'analogha inchiesta condotta nella legislatura precedente e approvata nel gennaio del 2018 (Commissione parlamentare di inchiesta, 2018);
- il secondo è l'emanazione di una Circolare ministeriale (rinominata Prot. 4064) recante le “*Linee guida per la gestione operativa degli stoccaggi negli impianti di gestione dei rifiuti e per la prevenzione dei rischi*”, pubblicata il 18 marzo 2018 (Ministero dell'Interno e del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2018).

A questi, sono seguite una serie di azioni volte a migliorare la gestione di questa tipologia di eventi incidentali (nelle fasi di prevenzione, di emergenza e post emergenza) da parte degli Enti coinvolti.

In questo contesto si inserisce Arpa Piemonte, l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale, “*un ente pubblico dotato di autonomia amministrativa, tecnico-giuridica, patrimoniale e contabile, posta sotto la vigilanza del Presidente della Giunta Regionale per garantire l'attuazione degli indirizzi programmatici della Regione Piemonte nel campo della previsione, prevenzione e tutela ambientale*” (di seguito Arpa) (Senato, 1995). Arpa (Piemonte, s.d.) svolge attività di supporto, di controllo e di raccolta ed elaborazione dati e, ad esempio, si occupa del monitoraggio della qualità delle matrici ambientali (soprattutto della matrice aria) in seguito al verificarsi di fenomeni quali gli incendi all'interno di impianti di gestione rifiuti (per ulteriori chiarimenti, si rimanda al capitolo terzo di questo elaborato).

Il presente lavoro è incentrato sullo studio degli incendi negli impianti di trattamento e stoccaggio dei rifiuti ed è finalizzato a descrivere la dinamica di tali incendi attraverso la caratterizzazione del termine sorgente; il progetto nasce proprio in collaborazione con questo Ente in risposta all'esigenza pratica di descrivere un fenomeno molto complesso, cioè un incendio in un impianto di gestione rifiuti, al fine di poter prevedere le conseguenze da esso causate sia in termini di potenza emessa, sia in termini di zone interessate dalla ricaduta dei fumi, la cui composizione rappresenta un'altra incognita di interesse. Il problema viene approcciato da diversi punti di vista: da un lato viene evidenziata la complessità della normativa vigente in ambito rifiuti e dei relativi obblighi in capo ai gestori degli impianti, con alcuni dati sulla produzione dei rifiuti e degli incendi occorsi in ambito nazionale e regionale; dall'altro lato vengono presentate le difficoltà della modellazione matematica di un incendio di cumulo di rifiuti e dell'utilizzo del software Phast per questo scopo, se possibile, proponendo, in caso contrario, un modello alternativo. Phast (versione 8.23 (DNV, Det Norske Veritas – Software, 2019)), è un software per le analisi delle conseguenze nell'ambito della sicurezza di processo, disponibile all'interno della struttura Arpa, il quale permette di simulare degli scenari che coinvolgono sostanze tossiche o infiammabili all'interno di industrie pericolose come oil & gas,

industria chimica e petrolchimica o di transizione energetica, ma anche di gasdotti, installazioni offshore¹ e processi di trasporto e stoccaggio. Tra gli scenari incidentali messi a disposizione dal Phast, si è scelto di utilizzare il modello di incendio di pozza di una sostanza liquida (pool fire), per la sua similitudine visiva con un incendio di cumulo di rifiuti.

Il progetto proposto da Arpa è molto vasto e impegnativo e il lavoro racchiuso all'interno di questo elaborato rappresenta solo una prima parte di esso. Lo sviluppo del progetto nel suo insieme può essere suddiviso in due macro argomenti, che sono strettamente connessi:

1. Studio del termine sorgente
2. Studio della dispersione degli inquinanti nell'ambiente circostante

Lo studio del termine sorgente rappresenta l'oggetto della presente tesi ed è incentrato sul trovare un modo opportuno per descrivere la dinamica di un incendio di rifiuti (di seguito incendio di cumulo) e successivamente valutare se sia possibile adattarla ai modelli presenti sul software di simulazione o proporre alternativamente un modello valido, che può essere sia presente in commercio sia strutturato ex-novo, a seconda della disponibilità di informazioni in letteratura.

Per fare ulteriore chiarezza su com'è stato svolto il lavoro e su quali sono gli argomenti che sono stati analizzati, si riporta di seguito una breve descrizione del contenuto di questo elaborato, suddiviso per capitoli.

Il prossimo capitolo si apre con una breve premessa incentrata sul fenomeno degli incendi associato agli impianti di trattamento e/o stoccaggio rifiuti, nella quale si evidenzia quanto questo problema sia sempre più presente nella realtà italiana. Dopo una breve trattazione della questione rifiuti e degli incendi negli impianti che si occupano della loro gestione, corredata dai dati numerici, si è scelto di inserire un inquadramento normativo sui rifiuti che prende in esame le diverse tipologie di rifiuti prodotti, la loro classificazione e caratterizzazione, seguito da un ampio spazio dedicato agli adempimenti normativi in capo ai gestori degli impianti che si occupano di rifiuti. A questo proposito, il quadro normativo risulta molto articolato e si compone di tre argomentazioni principali, che sono: aspetti ambientali, di prevenzione incendi e aspetti del rischio incendio specificatamente connessi agli impianti di gestione di rifiuti. Questi argomenti vengono poi trattati più approfonditamente con l'intento di fornire al lettore sia una visione generale utile alla comprensione dell'argomento, ma anche la consapevolezza della complessità della materia trattata.

Il terzo capitolo è suddiviso in tre sezioni:

- la prima si focalizza sul ruolo di Arpa in termini di attività di protezione ambientale e, nello specifico, sul ruolo che l'Ente assume in relazione alle emergenze incendi che si verificano specificatamente negli impianti di gestione rifiuti;
- la seconda è dedicata interamente alla strumentazione utilizzata durante il monitoraggio della qualità dell'aria in fase emergenziale e post-emergenziale;
- la terza prende in analisi tre casi di incendi occorsi all'interno di impianti di gestione rifiuti situati in provincia di Torino, riassumendo quanto riportato all'interno delle relazioni tecniche fornite dall'Ente.

Il capitolo si chiude con delle riflessioni su quanto emerso dalle relazioni tecniche, grazie alle quali si è presa coscienza di cosa si intenda per incendio di rifiuti e come può evolvere tale

¹ On-shore indica un'installazione sulla terraferma; off-shore indica un'installazione su una piattaforma sul mare

fenomeno, e a valle delle quali sono state formulate una serie di considerazioni e ipotesi presentate nel capitolo successivo.

All'interno del quarto capitolo viene presentata la fenomenologia dell'incendio con anche le opportune ipotesi per la sua caratterizzazione; a seguire, viene esplicitata la distinzione tra la combustione di materiali solidi e la combustione di sostanze liquide. In seguito, si ha una breve introduzione al software utilizzato, Phast, seguito da una panoramica sulle diverse tipologie di eventi incidentali disponibili per le simulazioni; tra questi, si è scelto di focalizzare l'attenzione sul fenomeno del pool fire² (i dati richiesti in input per l'avvio delle simulazioni nonché sui dati attesi in output vengono approfonditi in Appendice). Nell'ultima sezione del capitolo viene invece presentato il modello "Incendio di cumulo" strutturato ex-novo a partire da quanto rinvenuto in letteratura; che viene implementato su Microsoft Excel (2022). Si tratta di un modello matematico basato in parte su quanto riportato all'interno dei capitoli 6 e 7 del Quintiere (Quintiere, 2016) unitamente a diversi articoli ricercati in letteratura, grazie ai quali è stato possibile riuscire a definire il termine sorgente.

Infine, all'interno dell'ultimo capitolo vengono presentati i risultati ottenuti, il confronto tra le due impostazioni (Phast ed Microsoft Excel) e viene inoltre presentato il modello implementato su Microsoft Excel secondo un'impostazione simile a quella seguita sul software Phast. Il confronto è stato effettuato innanzitutto utilizzando la stessa sostanza, il metanolo, e successivamente viene testato il modello "Incendio di cumulo" utilizzando materiali solidi differenti che si trovano all'interno dei rifiuti più comuni soggetti ad incendi, come plastiche e legno. La parte finale del capitolo è dedicata alla presentazione del modello "Incendio di cumulo", utilizzato per la descrizione del termine sorgente, con le opportune considerazioni sul suo utilizzo.

² Il fenomeno del pool fire verrà ripreso adeguatamente all'interno del quarto capitolo del lavoro di tesi, al quale si rimanda per chiarimenti.

2. La problematica dei rifiuti e degli incendi ad essi correlati: inquadramento normativo e informazioni quantitative

A seguito del ripetersi di episodi di incendi all'interno degli impianti di trattamento e/o stoccaggio rifiuti, durante il periodo della XVII Legislatura³, è stata istituita una Commissione parlamentare di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti e su illeciti ambientali ad esse correlati. La Commissione è stata poi ricostituita nel 2018 e il lavoro svolto è stato descritto all'interno della relazione redatta dalla Commissione stessa e consultabile online (Commissione parlamentare di inchiesta, 2018)(Commissione parlamentare di inchiesta, 2021), nella quale vengono esposti diversi dati relativi agli incendi occorsi in due periodi consecutivi (2014-2017 e 2017-2019) che fanno riferimento a due Legislature consecutive.

La commissione parlamentare di inchiesta è un organo investito della funzione ispettiva, conoscitiva e di indagine, su materie di interesse pubblico; sono quindi uno dei mezzi attraverso cui si esplica la funzione ispettiva del Parlamento. L'articolo 82 della Costituzione della Repubblica Italiana disciplina la materia delle commissioni di inchiesta e riporta che *“Ciascuna Camera può disporre inchieste su materie di pubblico interesse. A tale scopo nomina fra i propri componenti una commissione formata in modo da rispecchiare la proporzione dei vari gruppi. La commissione d'inchiesta procede alle indagini e agli esami con gli stessi poteri e le stesse limitazioni dell'autorità giudiziaria”*; è quindi uno strumento utilizzato in seguito alla manifestazione di un problema che si ripercuote su scala nazionale, com'è stato per i rifiuti e il fenomeno degli incendi ad essi connesso.

All'interno della relazione sull'evoluzione del fenomeno degli incendi negli impianti di gestione dei rifiuti approvata dalla Commissione nella seduta del 4 agosto 2021, al paragrafo 1, *“Le attività della commissione”*, viene riportato che:

“L'inchiesta sul fenomeno degli incendi negli impianti di gestione di rifiuti deliberata nel corso dell'attuale Legislatura trae spunto dall'analoga inchiesta condotta nel corso della XVII Legislatura, che ha dato luogo a una Relazione approvata dalla Commissione il 17 gennaio 2018. L'interesse istituzionale della Commissione nella XVII Legislatura era stato determinato dal ripetersi di episodi di incendi in impianti di trattamento di rifiuti, di maggiore o minore gravità, oggetto di iniziale attenzione mediatica, dopo essere stati confinati nella preoccupazione senza voce pubblica sufficiente dei cittadini minacciati dalle conseguenze sull'ambiente di questi eventi; a fronte di ciò, mancava un report organico e realmente documentato sull'argomento. L'inchiesta della Commissione ha rivelato quello che ha assunto le dimensioni di un vero e proprio fenomeno nazionale, e l'approvazione e la diffusione della conseguente Relazione hanno costituito una delle premesse per una maggiore attenzione di tutte le autorità per quel fenomeno. [...] Dallo studio dei dati ottenuti la Commissione aveva tratto alcune valutazioni, prima fra tutte la forte interdipendenza tra eventi incendiari e mancata corretta chiusura del ciclo dei rifiuti. Si era rilevato un incremento nel tempo di eventi

³ Per Legislatura si intende il periodo in cui un dato organo legislativo è in carica e svolge il proprio mandato elettorale; in Italia la durata della carica è di cinque anni, salvo il caso di scioglimento anticipato. La Legislatura XVII corrisponde al periodo marzo 2013- marzo 2018, alla quale è seguita la Legislatura successiva, terminata prematuramente nell'Ottobre del 2022.

incendiari in impianti di gestione di rifiuti, dei quali si era fatta una prima differenziazione tra quelli occorsi in impianti di trattamento e quelli intervenuti in discariche. In secondo luogo, si era posta attenzione alla collocazione territoriale degli impianti colpiti, rilevando una inversione del flusso dei rifiuti verso il Nord Italia rispetto a storiche emergenze che hanno colpito in passato alcune regioni meridionali. [...] La valutazione complessiva in materia non aveva fornito una chiara e univoca spiegazione del fenomeno: erano comunque emersi dei fattori comuni per la maggior parte degli eventi portati all'attenzione della Commissione, quali la fragilità degli impianti – in termini di sistemi di sorveglianza e controllo – la rarefazione dei controlli di gestione degli impianti, nonché il potenziale sovraccarico di materia non gestibile quale ipotetica causa di incendi “liberatori” [...].

All'interno del medesimo documento viene rappresentata la situazione in termini di numero medio casi per anno durante i due periodi di osservazione, mediante il grafico riportato in figura 2.1. Si precisa che la raccolta dei dati relativi agli eventi incendiari occorsi non corrisponde a tutto il periodo della Legislatura XVII, l'analisi è stata infatti depurata delle informazioni antecedenti all'anno 2014 e non copre nemmeno tutta la Legislatura XVIII, fermandosi al 2019.

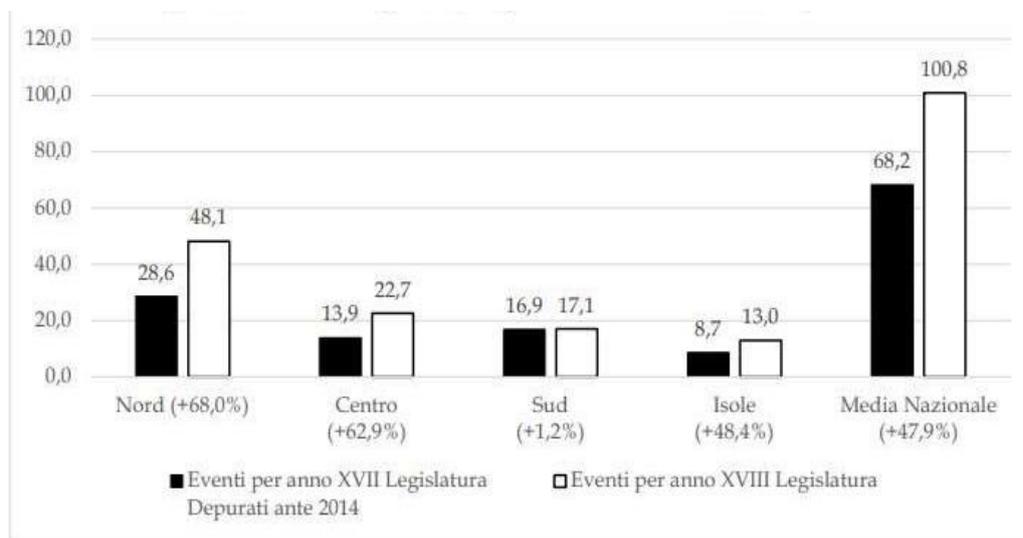


Figura 2.1 Numero medio annuale degli eventi di incendio negli impianti di gestione rifiuti rilevati nei due periodi di indagine (Legislature XVII e XVIII) dal 2014 al 2019 compresi – Grafico preso dal rapporto della Commissione parlamentare di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti e su illeciti ambientali ad esse correlati. (Doc. XXIII n. 14, 4 agosto 2021).

L'istogramma suddivide il territorio Nazionale in Nord, Centro, Sud e Isole, e mostra che l'aumento più significativo del numero di eventi è avvenuto in Italia settentrionale, con un +68.0% di eventi registrati durante il secondo periodo di indagine, seguito poi dal Centro, con un + 62.9%, Isole (+ 48.4%) e Sud (+ 1.2%). Nel complesso, su scala nazionale, si è registrato un incremento del numero medio annuale degli incendi in impianti di trattamento e/o stoccaggio rifiuti e pari al 47.9%. Come riportato nel documento stesso (Commissione parlamentare di inchiesta, 2021), “*La lettura di questi dati, insieme a quelli relativi alla loro evoluzione temporale, suggerisce che vi sia stata, insieme all'aumento globale dei casi sino al 2017, una significativa alterazione della distribuzione territoriale degli incendi; tra le forzanti del fenomeno potrebbero trovarsi:*

- una modifica del flusso dei rifiuti, a condizione di presupporre l'esistenza di un rapporto tra direzione dei flussi, legali o meno, e numero di eventi;
- una ingravescente difficoltà, nelle aree geografiche tradizionalmente meno colpite da difficoltà di smaltimento, nella gestione dei rifiuti; ciò può essere dovuto alla difficoltà di utilizzo, se non la loro chiusura, di canali di smaltimento verso altre aree geografiche anche all'estero; questo tipo di difficoltà può avere colpito con maggiore intensità le regioni del nord in quanto caratterizzate da una produzione complessiva di rifiuti molto maggiore del resto di Italia.”

Per contestualizzare meglio il problema, è utile fare una breve digressione sulla classificazione dei rifiuti, per poi fornire qualche informazione quantitativa sulla loro produzione su scala nazionale.

2.1 Classificazione dei rifiuti

Il D. Lgs. 152, di seguito TUA (Testo Unico Ambientale) (Decreto legislativo n.152, 2006), riporta all'interno della Parte IV, come da ultimo modificato col D. Lgs. 116/2020 (Decreto legislativo n.116, 2020), le norme in materia di gestione dei rifiuti; in particolare l' art. 183 riporta tra le definizioni quella di rifiuto, ovvero “*qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi*”, che include quindi una molteplicità di oggetti diversi, costituiti da materiali differenti ed eterogenei. Una prima distinzione fatta dalla normativa si basa sull'origine degli stessi e distingue tra rifiuti urbani e rifiuti speciali; una seconda distinzione è quella tra rifiuti pericolosi e non pericolosi.

Il medesimo articolo riporta la definizione di “rifiuti urbani”, tra i quali rientrano:

“

1. *i rifiuti domestici indifferenziati e da raccolta differenziata, ivi compresi: carta e cartone, vetro, metalli, plastica, rifiuti organici, legno, tessili, imballaggi, rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, rifiuti di pile e accumulatori e rifiuti ingombranti, ivi compresi materassi e mobili;*
2. *i rifiuti indifferenziati e da raccolta differenziata provenienti da altre fonti che sono simili per natura e composizione ai rifiuti domestici indicati nell'allegato L-quater prodotti dalle attività riportate nell'allegato L-quinquies;*
3. *i rifiuti provenienti dallo spazzamento delle strade e dallo svuotamento dei cestini portarifiuti;*
4. *i rifiuti di qualunque natura o provenienza, giacenti sulle strade ed aree pubbliche o sulle strade ed aree private comunque soggette ad uso pubblico o sulle spiagge marittime e lacuali e sulle rive dei corsi d'acqua;*
5. *i rifiuti della manutenzione del verde pubblico, come foglie, sfalci d'erba e potature di alberi, nonché i rifiuti risultanti dalla pulizia dei mercati;*
6. *i rifiuti provenienti da aree cimiteriali, esumazioni ed estumulazioni, nonché gli altri rifiuti provenienti da attività cimiteriale diversi da quelli di cui ai punti 3, 4 e 5. (137) [...]“*

All'interno dell'articolo successivo, è riportata invece la definizione di rifiuti speciali, che comprende:

“

- a) i rifiuti da attività agricole e agro-industriali;
- b) i rifiuti derivanti dalle attività di demolizione, costruzione, nonché i rifiuti pericolosi che derivano dalle attività di scavo, fermo restando quanto disposto dall'articolo 186;
- c) i rifiuti da lavorazioni industriali, fatto salvo quanto previsto dall'articolo 185, comma 1, lettera i);
- d) i rifiuti da lavorazioni artigianali;
- e) i rifiuti da attività commerciali;
- f) i rifiuti da attività di servizio;
- g) i rifiuti derivanti dalla attività di recupero e smaltimento di rifiuti, i fanghi prodotti dalla potabilizzazione e da altri trattamenti delle acque e dalla depurazione delle acque reflue e da abbattimento di fumi;
- h) i rifiuti derivanti da attività sanitarie;
- i) i macchinari e le apparecchiature deteriorati ed obsoleti;
- l) i veicoli a motore, rimorchi e simili fuori uso e loro parti;
- m) il combustibile derivato da rifiuti;
- n) i rifiuti derivati dalle attività di selezione meccanica dei rifiuti solidi urbani. “

Per la categorizzazione dei rifiuti si fa riferimento ai codici CER (acronimo per Catalogo Europeo dei Rifiuti), oggi EER (Elenco Europeo dei Rifiuti) cioè a un elenco di codici di classificazione dei rifiuti istituito dalla direttiva 75/442/CEE (sostituita dalla Direttiva del 2008/98/CE, come modificata dalla direttiva UE 2018/852)(Decreto legislativo n.116, 2020). I codici sono formati da sei cifre, disposte a coppie; la prima coppia fa riferimento al capitolo ed individua la fonte del rifiuto (vedi successiva tabella 2.2), cioè l'attività di origine; la seconda coppia individua il sottocapitolo e da informazioni sull'attività produttiva con riferimento alla lavorazione specifica, mentre la terza coppia identifica la specifica tipologia di rifiuto e fa riferimento alle sostanze effettivamente contenute nel rifiuto.

Ai rifiuti pericolosi viene attribuito un codice CER che presenta come apice un asterisco “*” e che permette di distinguerli subito dai rifiuti non pericolosi; esiste poi una terza categoria che riguarda i rifiuti individuati da codici CER “a specchio”; cioè codici che differiscono solamente per la presenza dell'asterisco e che sono attribuiti a rifiuti che possono essere sia pericolosi che non pericolosi, ma questa distinzione può essere fatta solamente tramite analisi di laboratorio, che possono evidenziare il superamento di alcuni parametri di soglia che rendono il rifiuto pericoloso. Si tratta di rifiuti la cui pericolosità non è determinabile attraverso le informazioni fornite dal CER o mediante la scheda di sicurezza delle sostanze contenute nel rifiuto; per gli altri tipi di rifiuto invece è possibile capire subito se sono pericolosi o meno e quindi non è necessario eseguire ulteriori analisi per la loro classificazione. I codici EER sono analoghi ai codici CER, anch'essi sono formati da tre coppie di cifre e mantengono la distinzione in rifiuti pericolosi e non pericolosi mediante l'utilizzo dell'asterisco. A questo proposito, nel momento in cui un rifiuto viene classificato come pericoloso, il produttore (che è responsabile dell'attribuzione del codice EER ai sensi del D. Lgs. 152/2006, Part IV)(Decreto Legislativo n. 15, 2006) è tenuto ad assegnare al rifiuto una o più classi di pericolosità “HP” (esplosivo, comburente, infiammabile, ...) alle quali sono associati i rischi in seguito alla dispersione in ambiente o alla cattiva gestione del rifiuto stesso.

Le sigle HP riguardano quindi la classificazione dei rifiuti pericolosi e li suddividono in 15 categorie, ai sensi del Regolamento UE 1357/2014 della Commissione del 18 dicembre 2014 e devono essere riportate su tutti i documenti riguardanti la gestione dei rifiuti stessi. Questa classificazione è differente rispetto a quella adottata per le sostanze chimiche e per le miscele, gestita mediante il Regolamento n. 1272/2008 noto come regolamento CLP (Inail, s.d.) (Classification, Labelling and Packaging), che allinea la precedente legislazione UE al GHS, cioè al sistema mondiale armonizzato di classificazione ed etichettatura delle sostanze chimiche ideato dalle Nazioni Unite per identificare le sostanze chimiche pericolose e informare gli utilizzatori in merito ai pericoli ad esse associati. All'interno del regolamento CLP le classi di pericolosità sono individuate con la lettera H e, come riportato all'interno della Circolare ministeriale del MiTE recante le *“Linee guida sulla classificazione dei rifiuti del SNPA di cui al decreto direttoriale n. 47 del 9 agosto 2021- Chiarimenti applicativi”*, *“Non esiste, infatti, una trasposizione diretta e univoca tra le caratteristiche di pericolo HP e le categorie Seveso. La valutazione deve essere quindi effettuata caso per caso, anche per i rifiuti non pericolosi, facendo riferimento alle specifiche disposizioni normative”* (MiTE,2021); quindi se all'interno di un rifiuto fossero presenti determinate sostanze o miscele pericolose allora questo potrebbe rientrare tra i rifiuti pericolosi a seconda della concentrazione di sostanza pericolosa in esso rilevata.

L'articolo 179 del TUA (Decreto legislativo, n.152, 2006) stabilisce i criteri di priorità nella gestione dei rifiuti, la quale *“avviene nel rispetto della seguente gerarchia:*

- a) *prevenzione;*
- b) *preparazione per il riutilizzo;*
- c) *riciclaggio;*
- d) *recupero di altro tipo, per esempio il recupero di energia;*
- e) *smaltimento. “*

Questo concetto è noto anche sotto il nome di *“piramide dei rifiuti”* e stabilisce una priorità di azione in relazione al problema dei rifiuti. In cima alla piramide c'è un'azione preventiva: limitando e prevenendo la produzione dei rifiuti si riduce il loro impatto e quindi si riduce anche l'entità del problema. Per riutilizzo si intende dare una nuova vita a un oggetto prima che questo venga etichettato come rifiuto. Queste prime due voci della gerarchia in Italia sono ancora in fase embrionale; al momento è molto più comune parlare di riciclaggio, recupero di altro tipo e smaltimento. Per completezza, si riportano le seguenti definizioni, estrapolate dall'articolo 183 del TUA:

- s) *“trattamento”: operazioni di recupero o smaltimento, inclusa la preparazione prima del recupero o dello smaltimento;*
- t) *“recupero”: qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile, sostituendo altri materiali che sarebbero stati altrimenti utilizzati per assolvere una particolare funzione o di prepararli ad assolvere tale funzione, all'interno dell'impianto o nell'economia in generale. [...]*
- z) *“smaltimento”: qualsiasi operazione diversa dal recupero anche quando l'operazione ha come conseguenza secondaria il recupero di sostanze o di energia. L'Allegato B alla parte IV del presente decreto riporta un elenco non esaustivo delle operazioni di smaltimento;*

aa) "stoccaggio": le attività di smaltimento consistenti nelle operazioni di deposito preliminare di rifiuti di cui al punto D15 dell'allegato B alla parte quarta del presente decreto, nonché le attività di recupero consistenti nelle operazioni di messa in riserva di rifiuti di cui al punto R13 dell'allegato C alla medesima parte quarta;

bb) "deposito temporaneo prima della raccolta": il raggruppamento dei rifiuti ai fini del trasporto degli stessi in un impianto di recupero e/o smaltimento, effettuato, prima della raccolta ai sensi dell'articolo 185-bis; [...]

Alle diverse operazioni, come recupero, smaltimento o deposito, sono associati impianti differenti, che possono essere adibiti a una o più funzioni contemporaneamente. Ad esempio, possono essere identificati come discariche, impianti di stoccaggio, impianti di trattamento, di recupero, centri di raccolta e di conferimento ed altri.

2.2 Dati sulla produzione rifiuti e focus sulla regione Piemonte

Per dare un'informazione quantitativa riguardante la produzione di rifiuti su scala nazionale, vengono riportati in tabella 2.1 i dati relativi la produzione di rifiuti urbani e speciali sul territorio italiano, suddiviso per macroaree geografiche (Nord, Centro e Sud). Le informazioni utilizzate all'interno del presente capitolo sono state estrapolate dal sito di ISPRA (Ispra, s.d.), l'istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, istituito con la legge 133/2008 di conversione, con modificazioni, del Decreto-legge 25 giugno 2008, n.112 (Senato, 2008). Si tratta di un Ente pubblico di ricerca, dotato di autonomia tecnica, scientifica, organizzativa, finanziaria, gestionale, amministrativa, patrimoniale e contabile, sottoposto alla vigilanza del Ministro della Transizione Ecologica (MiTE).

Tabella 2. 1 Dati di sintesi della produzione nazionale di rifiuti e della raccolta differenziata dei rifiuti urbani suddivisa per macroarea geografica (Ispra, s.d.).

Area	Popolazione (n. abitanti)	RU (t)	RS NP (t)	RS P (t)	Totale rifiuti speciali (t)	% RU sul totale
NORD	27.449.117	13.910.062	76.839.363	6.825.254	83.664.617	14%
CENTRO	11.755.548	6.160.946	23.515.003	1.227.056	24.742.059	20%
SUD	20.052.901	8.874.087	36.781.154	1.795.906	38.577.060	19%
ITALIA	59.257.566	28.945.094	137.135.520	9.848.216	146.983.736	16%

Da quanto riportato in tabella 2.1, la quantità di rifiuti prodotti nelle regioni del Nord Italia è paragonabile alla quantità prodotta unitamente dalle regioni del Centro e del Sud; un dato che rispecchia una realtà in cui la popolazione e (conseguentemente) la presenza delle attività industriali e lavorative risultano concentrate nella parte settentrionale del Paese. I rifiuti speciali non pericolosi rappresentano il 78% dei rifiuti prodotti in un anno a livello nazionale, seguiti da una percentuale pari al 16% per i rifiuti urbani e del 6% per i rifiuti speciali pericolosi.

I dati relativi alla regione Piemonte si dimostrano in linea col dato nazionale, evidenziando una produzione preponderante di rifiuti speciali in prevalenza non pericolosi (Arpa, s.d.); durante il

2020 si sono infatti prodotte circa 11 tonnellate di rifiuti speciali e circa 2 milioni di tonnellate di rifiuti urbani, dei quali approssimativamente il 65% è stato smistato grazie al servizio di raccolta differenziata.

Dai numeri riportati precedentemente relativi alla produzione di rifiuti risulta chiara la necessità di un adeguato numero di strutture che ne possano assicurare la corretta gestione. Solo all'interno della regione Piemonte si contano circa 2000 strutture di trattamento/stoccaggio rifiuti e anch'esse sono spesso soggette alla problematica degli incendi.

2.2.1 Rifiuti urbani

Com'è stato spiegato al precedente paragrafo, i rifiuti urbani sono quelli prodotti dalla popolazione (derivanti dalla raccolta differenziata), i rifiuti della pulizia delle strade, delle aree verdi e cimiteriali, tutti i rifiuti non pericolosi raccolti in luoghi diversi da quelli abitativi e assimilabili ai rifiuti urbani per qualità e quantità. Esistono anche rifiuti urbani pericolosi, ad esempio le pile esauste, i barattoli di vernici, colle, solventi, ed altri.

Il totale dei rifiuti urbani prodotti può derivare da tre situazioni differenti:

- la prima è rientrare nella frazione raccolta mediante il servizio di raccolta differenziata
- la seconda è essere un rifiuto ingombrante, che non può essere recuperato in altro modo e quindi venire mandato a smaltimento
- nel terzo caso, si ha a che fare con rifiuti indifferenziati (rifiuti solidi urbani non differenziati) compresi quelli derivanti dallo spazzamento stradale.

Circa il 65% dei rifiuti urbani (dato nazionale) passa attraverso il servizio di raccolta differenziata; si riporta in figura 2.2 un istogramma che riguarda proprio questa parte di rifiuti, con riferimento ai dati raccolti da Ispra Ambiente relativi alla situazione in Piemonte nell'anno 2020 (Ispra, s.d.). Dalla rappresentazione grafica della raccolta differenziata piemontese si nota che, in termini di massa, le frazioni preponderanti nella raccolta differenziata sono:

- frazione organica (21.9%);
- carta e cartone (14%);
- vetro (7.9%);
- plastica (6.9%);
- legno (4.7%);
- ingombranti misti (3.4%).

Oltre alle frazioni merceologiche derivanti dalla raccolta differenziata, tra le varie tipologie di rifiuti urbani circa il 35% viene classificato come "Indifferenziato"; si tratta ad esempio di oggetti in gomma, giocattoli, lettiere, mozziconi e tanti altri rifiuti composti da materiali molto diversi tra loro ma che non possono essere recuperati e differenziati. Sicuramente tra questi ci saranno dei materiali che possono essere facilmente oggetto di combustione; tuttavia, la caratterizzazione dei rifiuti presenti nell'indifferenziato può essere molto complicata. Ragionando in termini di codici EER, quando un rifiuto viene conferito in un centro di raccolta è destinato ad essere contaminato da altri rifiuti che magari presentano lo stesso codice ma, avendo una provenienza differente, hanno anche una differente composizione, magari si tratta di materiale plastico ma di diversa tipologia e si perde quindi l'informazione specifica su

ciascun rifiuto; in questo senso diventa complicato sapere con precisione cosa è presente all'interno del cumulo di conferimento, anche si ha un'indicazione di massima.

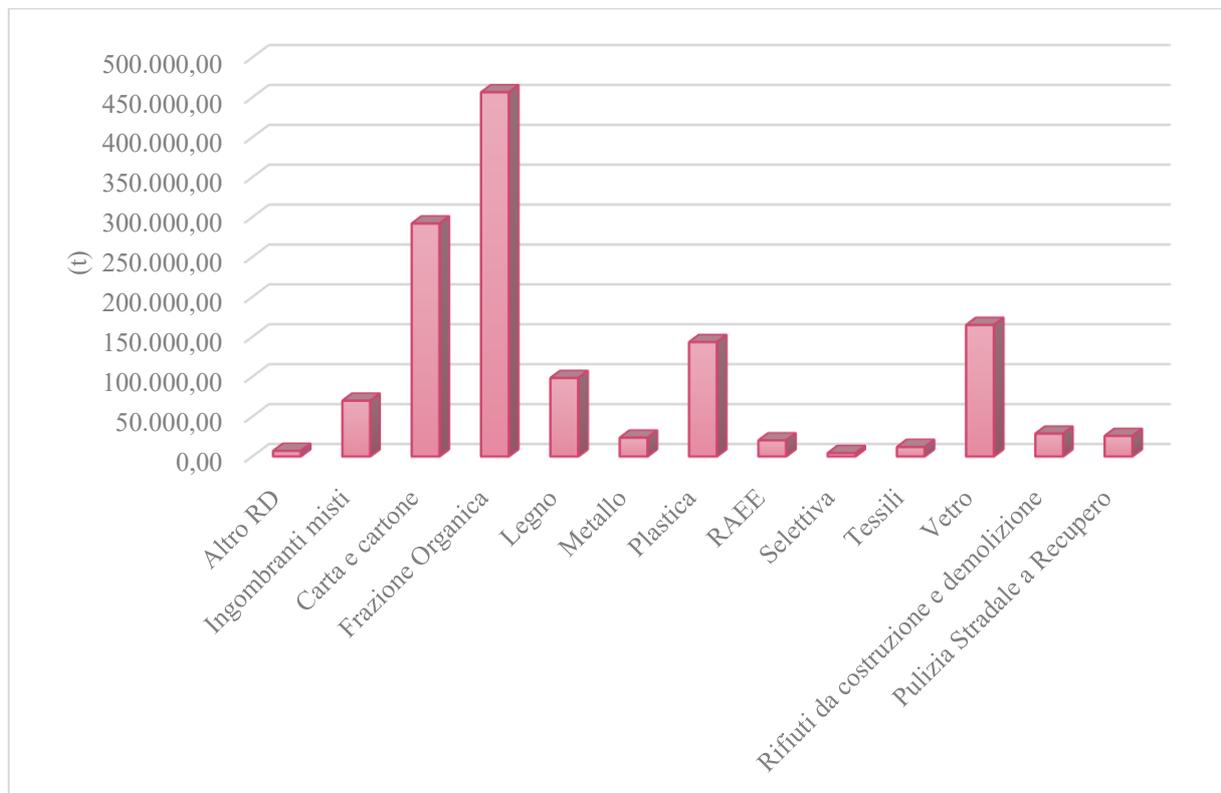


Figura 2. 2 Istogramma delle frazioni merceologiche ottenute dalla raccolta differenziata nella regione Piemonte (*Ispra, s.d.*).

Si ritiene importante precisare che la sezione riguardante i rifiuti urbani è stata riportata perché spesso quando si parla di rifiuti il primo pensiero riguarda sempre i rifiuti urbani e, in particolare, i rifiuti raccolti attraverso i servizi di raccolta differenziata. Questo probabilmente accade perché è la situazione più vicina a qualsiasi cittadino e permette di rendersi conto, giorno dopo giorno, del contributo che ciascuno di noi dà alla produzione di rifiuti. Non solo; fare la raccolta differenziata trasmette l'idea di un impegno collettivo e in qualche modo trasmette anche l'illusione che sia sufficiente che ciascun cittadino all'interno delle mura domestiche si ricordi di gettare correttamente l'immondizia per risolvere un problema vasto come quello dei rifiuti. In quest'ottica, la breve analisi sulla produzione dei rifiuti urbani rispetto ai rifiuti speciali è servita a evidenziare quanto poco significativo sia l'impatto associato ai rifiuti prodotti dal singolo cittadino, rispetto a quello associato ai rifiuti derivanti da attività produttive, e quanto sia ancora meno significativo l'impatto della raccolta differenziata urbana se paragonato a tutti i rifiuti che vengono prodotti. Questo non vuol dire che non debba essere fatta, però rappresenta solo una piccola parte di una soluzione che è molto più complessa, così come lo è il problema di cui si sta parlando.

2.2.2 Rifiuti speciali

I rifiuti speciali rappresentano circa l'85% della totalità dei rifiuti prodotti (dato nazionale) e a questa categoria appartengono tutti i rifiuti derivanti dalle attività produttive (come agricoltura, artigianato, industria e commercio), dalle attività di servizio (trasporti, strutture sanitarie,...) e dalle attività di trattamento dei rifiuti stessi e delle acque reflue.

All'interno del sito di Ispra Ambiente i dati sulla produzione dei rifiuti speciali sono riportati seguendo due modalità differenti:

- la prima si basa sull'attività economica di provenienza, tuttavia in questo modo si arrivano ad avere quasi un centinaio di categorie differenti e il processo diventa dispersivo, perdendo efficienza nella comunicazione dei risultati;
- la seconda si basa sulla classificazione ufficiale con riferimento al codice EER. Per essere precisi, la suddivisione riguarda solo il capitolo del codice EER che, come riportato precedentemente, rappresenta la prima coppia di cifre costituenti il codice numerico (si fa riferimento a quanto riportato in tabella 2.2).

Al fine di visualizzare la situazione in Piemonte, si è scelto di seguire la seconda modalità, che è molto più intuitiva rispetto alla prima, riportando all'interno dell'istogramma in figura 2.3 la quantità di rifiuti prodotta, espressa in tonnellate, associata a ciascun capitolo. Sono stati presi come riferimento i dati raccolti da Ispra Ambiente sulla regione Piemonte e relativi all'anno 2020 (Ispra, s.d.).

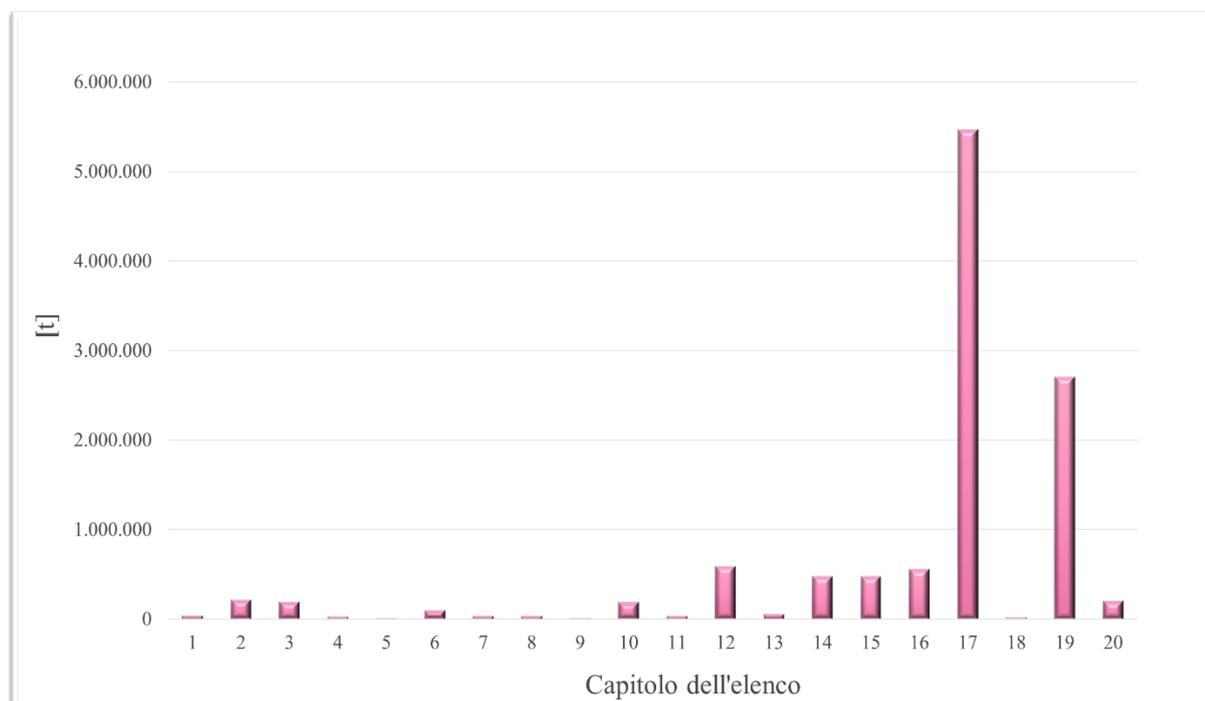


Figura 2. 3 Istogramma che rappresenta le tonnellate di rifiuti speciali prodotti nell'anno 2020 In Piemonte suddivisi per Capitolo dell'Elenco Europeo, in riferimento ai dati Ispra (Ispra, s.d.)

Dal momento che si ritiene che il solo istogramma in figura 2.3 non sia sufficiente per una corretta informazione del lettore riguardo la produzione di rifiuti speciali, si è deciso di creare la seguente tabella (tabella 2.2). Al suo interno sono riportati i 20 capitoli dell'Elenco Europeo

dei Rifiuti associati alla rispettiva descrizione ed accompagnati dal dato di produzione dei rifiuti speciali, sempre in riferimento all'anno 2020, con distinzione tra rifiuti speciali non pericolosi (RS NP) e rifiuti speciali pericolosi (RS P).

Tabella 2. 2 Produzione dei rifiuti speciali pericolosi e non pericolosi della regione Piemonte per Capitolo dell'Elenco Europeo dei Rifiuti (*Ispra, s.d.*).

Capitolo dell'Elenco	Descrizione	RS NP (t)	RS P (t)	Totale (t)	% Sul totale
1	Rifiuti derivanti da prospezione, estrazione da miniera o cava, nonché' dal trattamento fisico o chimico di minerali	36.453	-	36.453	0,33%
2	Rifiuti prodotti da agricoltura, orticoltura, acquacoltura, selvicoltura, caccia e pesca, trattamento e preparazione di alimenti	212.791	2	212.793	1,93%
3	Rifiuti della lavorazione del legno e della produzione di pannelli, mobili, polpa, carta e cartone	179.826	9.873	189.699	1,72%
4	Rifiuti della lavorazione di pelli e pellicce e dell'industria tessile	23.270	13	23.283	0,21%
5	Rifiuti della raffinazione del petrolio, purificazione del gas naturale e trattamento pirolitico del carbone	1.469	2.139	3.608	0,03%
6	Rifiuti dei processi chimici inorganici	89.985	5.603	95.588	0,87%
7	Rifiuti dei processi chimici organici	50.429	95.192	145.621	1,32%
8	Rifiuti della produzione, formulazione, fornitura ed uso (PFFU) di rivestimenti (pitture, vernici e smalti vetrati), adesivi, sigillanti e inchiostri per stampa	19.734	9.516	29.250	0,27%
9	Rifiuti dell'industria fotografica	37	719	756	0,01%

10	Rifiuti provenienti da processi termici	151.956	34.303	186.259	1,69%
11	Rifiuti prodotti dal trattamento chimico superficiale e dal rivestimento di metalli ed altri materiali. Idrometallurgia non ferrosa	8.420	20.224	28.644	0,26%
12	Rifiuti prodotti dalla lavorazione e dal trattamento fisico e meccanico superficiale di metalli e plastica	512.608	76.662	589.270	5,35%
13	Oli esauriti e residui di combustibili liquidi (tranne oli commestibili, voci 05 e 12)	-	51.455	51.455	0,47%
14	Solventi organici, refrigeranti e propellenti di scarto (tranne le voci 07 e 08)	-	4.298	4.298	0,04%
15	Rifiuti di imballaggio. Assorbenti, stracci, materiali filtranti e indumenti protettivi non specificati altrimenti	449.076	23.103	472.179	4,29%
16	Rifiuti non specificati altrimenti nell'elenco	344.880	212.258	557.138	5,06%
17	Rifiuti delle attività di costruzione e demolizione (compreso il terreno proveniente da siti contaminati)	5.284.236	180.630	5.464.866	49,63%
18	Rifiuti prodotti dal settore sanitario e veterinario o da attività di ricerca collegate (tranne i rifiuti di cucina e di ristorazione che non derivino direttamente da cure sanitarie)	263	15.099	15.362	0,14%
19	Rifiuti prodotti da impianti di gestione dei rifiuti, impianti di trattamento delle acque reflue fuori sito, nonché dalla potabilizzazione dell'acqua	2.391.704	313.163	2.704.867	24,57%

	e dalla sua preparazione per uso industriale				
20	Rifiuti urbani (rifiuti domestici e assimilabili prodotti da attività commerciali e industriali nonché' dalle istituzioni) inclusi i rifiuti della raccolta differenziata	198.117	1.485	199.602	1,81%
Totale	-	9.955.254	1.055.737	11.010.991	-

Osservando i dati riportati in tabella 2.2 e l'istogramma in figura 2.3, si possono individuare le attività produttive associate a una maggiore produzione di rifiuti speciali. Subito si evidenziano i rifiuti associati al Capitolo 17, tra cui rientrano i rifiuti delle attività di costruzione e demolizione, compreso il terreno proveniente da siti contaminati, ed al Capitolo 19, in cui compaiono i rifiuti prodotti da impianti di gestione dei rifiuti, impianti di trattamento delle acque reflue fuori sito, nonché dalla potabilizzazione dell'acqua e dalla sua preparazione per uso industriale; tuttavia, nessuno di questi è di particolare interesse per la presente tesi. Più interessanti sono i Capitoli 12 e 15, associati rispettivamente a rifiuti prodotti dalla lavorazione e dal trattamento fisico e meccanico superficiale di metalli e plastica, ed a rifiuti di imballaggio, costituiti ad esempio da plastica, materiali ligno-cellulosici, vetro, fibre, cartone, e tra questi materiali ce ne sono alcuni che possono prendere fuoco con facilità in presenza di innesco.

2.3 Adempimenti normativi per i gestori dei rifiuti

Negli ultimi anni gli obblighi normativi in capo ai gestori dei rifiuti sono aumentati perché, oltre ad aspetti ambientali e inerenti alla prevenzione incendi, si è inserito di recente un nuovo filone riguardante la predisposizione di PEI e PEE specificatamente negli impianti che gestiscono rifiuti, il quale nasce in risposta al problema emergente degli incendi all'interno di queste strutture.

A questo proposito, si è ritenuto necessario approfondire meglio il quadro normativo nel quale sono inseriti gli impianti di gestione/trattamento rifiuti; questo, infatti, è abbastanza complesso e si articola su:

- aspetti ambientali, regolamentati dal TUA (Decreto legislativo, 2006);
- aspetti di prevenzione incendi, regolamentati dal Codice di prevenzione incendi;
- aspetti di prevenzione del rischio incendio specifici per impianti che gestiscono rifiuti.

Per meglio illustrare la complessità normativa, si anticipa uno schema riassuntivo riportato in figura 2.4 che racchiude i principali riferimenti normativi meglio illustrati in seguito.

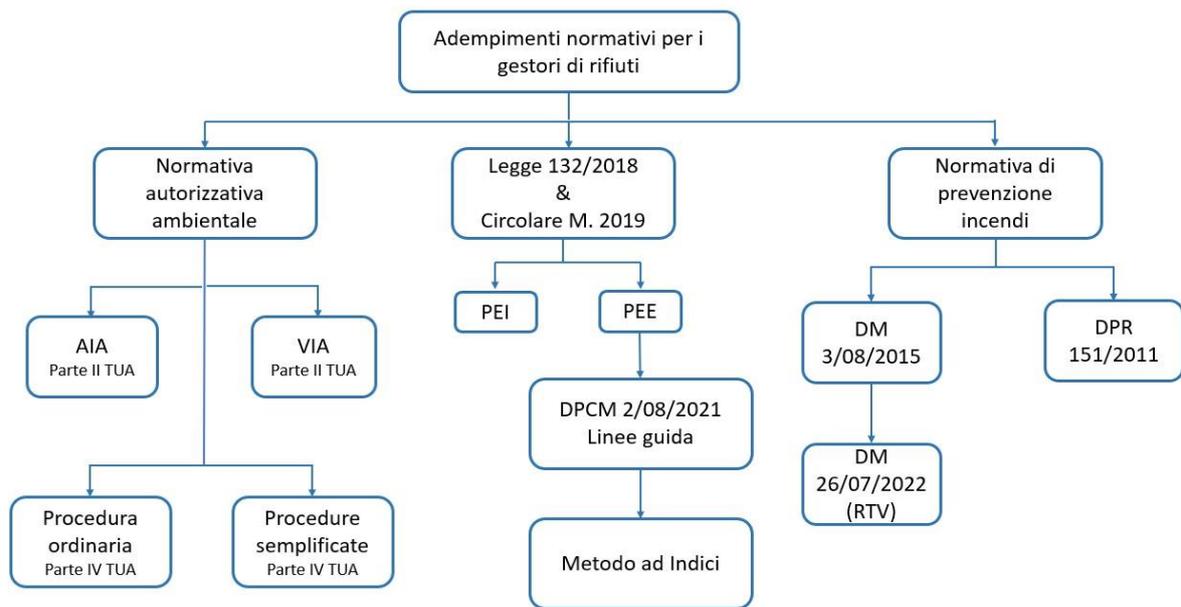


Figura 2. 4 Schema semplificativo sui principali adempimenti normativi per i gestori di rifiuti.

Dallo schema emerge una normativa specifica che discende dal lavoro riassunto nella Commissione di inchiesta e rappresentata dalla legge 132/2018 (Senato, s.d., 2008); affiancata dalla Circolare ministeriale, sempre del 2018, relativa alla gestione operativa degli stoccaggi negli impianti di gestione dei rifiuti. Quest’aspetto specifico relativo agli impianti di rifiuti si innesta su una normativa pre esistente suddivisa in due macro aree: la normativa autorizzativa ambientale (ramo di sinistra) e la normativa di prevenzione incendi (ramo di destra).

Il discorso si apre con la normativa specifica per gli impianti che gestiscono rifiuti, che nasce in risposta al problema degli incendi approfonditamente spiegato dalla Commissione.

2.3.1 Circolare marzo 2018

Il dilagare del fenomeno degli incendi all’interno di impianti di gestione dei rifiuti ha portato, come anticipato nella Premessa, all’interessamento della “Commissione parlamentare di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti e su illeciti ambientali ad esse correlati“. Anche il Ministero dell’Ambiente non ha tardato a prendere posizione, emanando il 18 marzo del 2018 una Circolare ministeriale (RIN Prot. 4064) (Ministero dell’Interno e del Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2018) recante le “*Linee guida per la gestione operativa degli stoccaggi negli impianti di gestione dei rifiuti e per la prevenzione dei rischi*”, con le seguenti premesse:

“A seguito dei numerosi incendi che nell’ultimo periodo hanno interessato diversi impianti di gestione dei rifiuti, con conseguenti ripercussioni sulla gestione dell’intero sistema paese, è stato convenuto, in accordo con le Autorità territoriale e con gli Enti di controllo preposti, di individuare alcune aree di approfondimento per la definizione di criteri operativi utili per una gestione ottimale degli stoccaggi negli impianti che gestiscono rifiuti. Sono richiamati alcuni importanti concetti già ampiamente definiti nell’ambito delle linee guida per l’individuazione e l’utilizzazione delle migliori tecniche disponibili in materia di gestione dei rifiuti in vigore, relative allo stoccaggio ed alla movimentazione dei rifiuti. Pertanto, di seguito si elencano percorsi utili per la gestione delle situazioni critiche, da implementare a cura delle Autorità

preposte.” In aggiunta, alla voce “*La prevenzione del rischio negli impianti di gestione dei rifiuti*”, viene riportato che: “ [...] *prioritariamente alla corretta gestione della fase operativa dell'emergenza, assume grande importanza l'attività della prevenzione del rischio, attraverso:*

- *l'ottimizzazione delle misure organizzative e tecniche nell'ambito di ciascun impianto in cui vengono effettuati stoccaggi di rifiuti;*
- *l'adeguata formazione del personale che opera negli impianti;*
- *l'utilizzo di sistemi di monitoraggio e controllo;*
- *l'adeguata manutenzione delle aree, dei mezzi d'opera e degli impianti tecnologici, nonché degli eventuali impianti di protezione antincendi.*

Ovviamente la natura del rischio, e le conseguenti azioni di prevenzione da adottare, dipendono dalla tipologia di rifiuto e di attività che si svolgono all'interno di un determinato impianto [...]”

2.3.2 Legge 132/2018

Col Decreto-legge, emanato il 4 ottobre 2018 e convertito in legge il 1° dicembre del medesimo anno (legge di conversione del Decreto-legge 4 ottobre 2018, n. 113) sono stati introdotti nuovi obblighi relativi ai Piani di Emergenza per gli impianti di stoccaggio e lavorazione dei rifiuti; adottati come misura preventiva a seguito del crescente numero di roghi all'interno di questi impianti. L'art. 26-bis della Legge 132/2018 prevede, infatti, l'obbligo per i gestori di impianti di stoccaggio e di lavorazione dei rifiuti, esistenti o di nuova costruzione, di predisporre un Piano di Emergenza Interna (PEI) e di trasmettere al Prefetto tutte le informazioni utili per l'elaborazione di un eventuale Piano di Emergenza Esterna (PEE).

Il PEI è redatto dal gestore dello stabilimento con la consultazione dei lavoratori; infatti, citando l'articolo 26bis del Decreto Sicurezza (Decreto-legge n.113, 2018), “*I gestori di impianti di stoccaggio e di lavorazione dei rifiuti, esistenti o di nuova costruzione, hanno l'obbligo di predisporre un piano di emergenza interna allo scopo di:*

- a) *Controllare e circoscrivere gli incendi in modo da minimizzarne gli effetti e limitarne i danni per la salute umana, per l'ambiente e per i beni;*
- b) *Mettere in atto le misure necessarie per proteggere la salute umana e l'ambiente dalle conseguenze di incidenti rilevanti;*
- c) *Informare adeguatamente i lavoratori e i servizi di emergenza e le autorità locali competenti;*
- d) *Provvedere al ripristino e al disinquinamento dell'ambiente dopo un incidente rilevante.* “

È necessario precisare che l'articolo 26-bis non si applica agli impianti che ricadono nel D. Lgs. 105/2015, cioè gli impianti a Rischio di Incidente Rilevante (di seguito RIR), che sono invece sottoposti alla normativa Seveso, la quale comunque prevede la redazione di PEI e PEE per limitare le possibili conseguenze dannose per l'uomo o per l'ambiente.

I piani di emergenza interni devono essere poi riesaminati e aggiornati dal gestore in seguito a modifiche nell'impianto, e comunque ad intervalli non superiori ai 3 anni. Il gestore deve poi occuparsi di trasmettere al prefetto competente tutte le informazioni necessarie per l'elaborazione o per l'aggiornamento del piano di emergenza esterno. Nel farlo, il prefetto ha il compito di chiedere la consultazione della popolazione e di gruppi di lavoro in cui rientrano

Vigili del Fuoco, la Regione, e altri Enti, tra cui anche Arpa; nel documento vengono esplicitati i possibili scenari e i risvolti di un incendio in una determinata località, e le conseguenze sulle zone limitrofe e sui soggetti sensibili posti nelle vicinanze.

All'interno delle Linee Guida sono indicati i requisiti minimi in termini di contenuti da inserire all'interno del PEI e le informazioni utili da fornire al Prefetto per l'elaborazione del PEE, tra cui:

- a) *ragione sociale e indirizzo dell'impianto;*
- b) *nominativo e recapiti del gestore dell'impianto e del responsabile per la sicurezza;*
- c) *descrizione dell'attività svolta e dei relativi processi, indicazione del numero degli addetti;*
- d) *elenco delle autorizzazioni/certificazioni nel campo ambientale e della sicurezza in possesso della società;*
- e) *planimetria generale dalla quale risultino l'ubicazione dell'attività, il contesto territoriale circostante, le condizioni di accessibilità all'area e di viabilità;*
- f) *piante in scala adeguata degli edifici e delle aree all'aperto utilizzate per le attività recanti l'indicazione degli elementi caratteristici: layout dell'impianto, con identificazione delle aree di accettazione in ingresso, delle aree di stoccaggio e trattamento e degli impianti tecnici, degli uffici e delle misure di sicurezza e protezione riportate nella relazione tecnica;*
- g) *relazione tecnica contenente almeno i seguenti elementi:*
 - 1) *quantità e tipologia dei rifiuti gestiti e indicazione della massima capacità di stoccaggio istantanea consentita. Nel caso l'impianto gestisca rifiuti pericolosi, devono essere indicate le relative caratteristiche di pericolo e specificate le modalità di gestione adottate;*
 - 2) *descrizione degli impianti tecnici;*
 - 3) *descrizione delle misure di sicurezza e protezione adottate, anche in relazione alla gestione dell'impianto;*
- h) *descrizione, dei possibili effetti sulla salute umana e sull'ambiente che possono essere causati da un eventuale incendio, esplosione o rilascio/spandimento;*
- i) *descrizione delle misure adottate nel sito per prevenire gli incidenti e per limitarne le conseguenze per la salute umana, per l'ambiente e per i beni;*
- j) *descrizione delle misure previste per provvedere al ripristino e al disinquinamento dell'ambiente dopo un incidente;*
- k) *descrizione delle disposizioni per avvisare tempestivamente le autorità competenti per interventi in caso di emergenza (Vigili del fuoco, Prefettura, ARPA, ecc.).*

Tale elenco non è da considerarsi esaustivo, ma è stato introdotto a titolo esemplificativo e quindi il Prefetto e le autorità competenti possono chiedere tutte le informazioni aggiuntive che ritengono necessarie per una corretta individuazione degli effetti che possono essere provocati dagli incidenti individuati durante la valutazione dei rischi.

Si osserva che gli obblighi attribuiti ai gestori degli impianti di stoccaggio e di lavorazione dei rifiuti associati alla predisposizione dei PEI e dettati dall'articolo 26-bis della Legge 132/2018 ricalcano quelli previsti per gli stabilimenti a rischio di incidente rilevante soggetti al D. Lgs. 105/2015.

2.3.2.1 Confronto con Seveso

Se da una parte risulta evidente l'analogia tra l'obbligo normativo introdotto attraverso il Decreto Sicurezza (Legge 132/2018) e le predisposizioni disciplinate all'interno della normativa Seveso III (D. Lgs. 105/2015), dall'altra sono evidenti anche le differenze tra le due realtà, impianti RIR e impianti di trattamento rifiuti, che vengono esplicitate di seguito.

1. La prima differenza importante riguarda il numero di soggetti coinvolti; nella regione Piemonte, infatti, si contano circa 80 stabilimenti RIR, di cui circa 40 in soglia superiore (e quindi soggetti anche alla redazione del Rapporto di Sicurezza). Per quanto concerne gli impianti di trattamento/stoccaggio rifiuti, l'ordine di grandezza è di due volte superiore in quanto si hanno circa 2000 impianti distribuiti in tutta la regione. Per questi ultimi, non è prevista dalla Legge 132/2008 alcuna distinzione in termini di soglie, quindi sono tutti soggetti alla medesima procedura indipendentemente dai quantitativi trattati, almeno per quanto riguarda gli obblighi relativi alla redazione del PEI e del PEE.
2. Un secondo aspetto riguarda l'analisi dei rischi, cioè una valutazione che in generale può essere qualitativa o quantitativa del rischio associato ad una situazione ben definita e ritenuta una possibile fonte di pericolo. Per gli stabilimenti RIR viene effettuata un'analisi quantitativa dei rischi svolta dai Gestori che definisce il rischio in termini di frequenza di accadimento e valutazione delle conseguenze degli eventi incidentali analizzati in termini di aree di danno; queste vengono poi utilizzate per la definizione delle aree di pianificazione dell'emergenza esterna. Per quanto concerne gli impianti di trattamento/stoccaggio rifiuti la normativa non prevede l'analisi dei rischi quantitativa e la stima delle aree di danno da parte del gestore, ma all'interno del DPCM del 27 agosto 2021 (Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri, 2021) viene fornito "*in prima approssimazione*" un metodo speditivo ad indici per la definizione della distanza di attenzione sulla base del livello di rischio qualitativo dell'attività (basso, medio, alto).
3. Una terza differenza, che in parte è stata anticipata quando si è parlato del codice EER dei rifiuti, riguarda l'identificazione delle sostanze e delle miscele pericolose adottata negli stabilimenti RIR rispetto alla classificazione dei rifiuti pericolosi. Una sostanza o una miscela, cioè l'insieme di due o più sostanze, viene classificata attraverso il regolamento CLP (CE) n. 1272/2008 entrato in vigore il 20 gennaio 2009 (Inail, s.d.), che permette di sapere se una sostanza/miscela è pericolosa o meno, con certezza. Per i rifiuti la situazione è più complessa; essi possono presentare composizioni differenti pur avendo il medesimo codice EER, con conseguenti difficoltà nello stabilirne la pericolosità. Il non avere una composizione certa porta all'impossibilità di stabilire la composizione dei fumi di combustione impedendo la valutazione dei possibili effetti di danno associati all'incendio.
4. Un'ultima differenza che emerge come diretta conseguenza del primo punto riguarda la gestione dei controlli. A differenza di quanto succede per gli impianti RIR, quando si tratta di impianti di gestione/ trattamento rifiuti non sono previsti dei controlli specifici riguardanti la corretta stesura dei PEI. Questo non significa che questi stabilimenti non siano soggetti a controlli; tuttavia, i controlli effettuati riguardano o la verifica delle prescrizioni autorizzative (AIA, Procedure ordinarie e semplificate) oppure sono dei controlli a campione effettuati per la verifica del rispetto della normativa antincendio. Il numero relativamente ridotto di impianti RIR rende la pianificazione dei controlli ad essi relativi relativamente "semplice" mentre è non è possibile effettuare dei controlli

puntuali sugli impianti di trattamento/stoccaggio rifiuti; perciò, si fanno dei controlli a campione.

2.3.3 Circolare 2019 e DPCM 27/08/2021

Dopo l'introduzione degli obblighi relativi la stesura di PEI e PEE attraverso la legge 132/2018 ^[15], l'anno successivo, il 13/02/2019, è stata diffusa la Circolare ministeriale n. 3058 (Ministero dell'Interno e del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2018), recante le prime indicazioni in merito alle informazioni che i gestori degli impianti di stoccaggio/trattamento rifiuti devono fornire ai Prefetti per la predisposizione del PEE. Nel momento in cui è stato richiesto alle prefetture di occuparsi della redazione dei PEE, sono emerse molte difficoltà applicative in parte derivanti dall'utilizzo di una procedura simil-Seveso applicata a un contesto totalmente differente, come si è cercato di far emergere dai punti elencati nel paragrafo precedente. All'interno della Circolare Ministeriale è stata inoltre stabilita la composizione dell'unità di coordinamento per stilare le linee guida per la predisposizione del piano di emergenza esterna e per la relativa informazione della popolazione. Il gruppo di lavoro era formato dai rappresentanti della Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento di protezione civile, del Ministero dell'interno – Dipartimento dei vigili del fuoco, del soccorso pubblico e della difesa civile, del Ministero della transizione ecologica, del Dipartimento di ingegneria industriale dell'università degli studi di Padova e ha portato alla luce, nel novembre del 2020, la proposta di *“Linee guida per la predisposizione del piano di emergenza esterna e per la relativa informazione della popolazione per gli impianti di stoccaggio e trattamento dei rifiuti”*, di seguito Linee guida (Presidente del Consiglio dei Ministri, 2021), approvate attraverso il DPCM del 27 agosto 2021 (e aggiornato a luglio 2022).

All'interno del documento, viene specificato che:

“Le linee guida contengono, in particolare, le indicazioni per una procedura di intervento da attuare secondo livelli progressivi, con la finalità di definire in maniera sintetica e puntuale le modalità operative di intervento per la gestione dell'emergenza connessa ai possibili eventi incidentali occorrenti negli impianti di stoccaggio e trattamento, quali ad esempio gli incendi, con formazione e diffusione di sostanze inquinanti all'esterno dell'impianto stesso. Le presenti linee guida sono, pertanto, strutturate in tre parti:

- *una parte contenente un metodo ad indici per la determinazione speditiva della distanza di attenzione, ai fini della Pianificazione di emergenza esterna;*
- *una metodologia speditiva per la realizzazione di detta pianificazione a livello provinciale;*
- *schede contenenti dati relativi al gestore, agli elementi critici dei singoli impianti, agli elementi territoriali ed ambientali vulnerabili, finalizzati a fornire elementi utili in fase di attuazione del PEE.”*

Viene presentato per la prima volta un metodo per la pianificazione delle aree di emergenza esterna, che passa attraverso l'individuazione di una “distanza di attenzione” mediante l'utilizzo di un indice di rischio generale associato all'impianto. L'indice di rischio viene calcolato attraverso un metodo speditivo ad indici messo a punto appositamente per gli impianti di stoccaggio/trattamento rifiuti e si basa sui dati forniti dal gestore. Si tratta di una metodologia di valutazione speditiva del rischio incendio che prevede l'attribuzione di determinati punteggi sia a fattori di rischio che a fattori di prevenzione e protezione presenti nell'impianto, tenendo in considerazione anche i pericoli per la salute umana e per l'ambiente circostante.

L'indice di rischio è definito come:

$$IR = Pr + Pt - FC + FD \quad (2. 1)$$

Dove:

- Pr = Indice di rischio connesso allo stoccaggio dei rifiuti;
- Pt = Indice di rischio connesso al trattamento dei rifiuti;
- FC = fattore di credito relativo alle misure di mitigazione del rischio;
- FD = fattore di debito che tiene conto della pericolosità per l'uomo e l'ambiente sull'area esterna al deposito in conseguenza di un incendio.

L'indice di rischio IR è associato poi a un livello qualitativo di rischio, ovvero rischio basso, rischio medio-basso, rischio medio, rischio medio-alto, rischio alto, al quale è associata una distanza di attenzione. Come riportato all'interno delle Linee guida, *“Per distanza di attenzione si intende la distanza massima tra il confine dell'area su cui insiste l'impianto di stoccaggio e/o trattamento dei rifiuti ed il confine dell'area di pertinenza del bersaglio sensibile o l'estremità dell'elemento rilevante (es. corso d'acqua, autostrada, ecc.), per la quale l'impatto di un incendio potrebbe ritenersi non trascurabile, in funzione dell'evoluzione dello scenario, in termini di effetti sulla salute umana e sull'ambiente e tale da richiedere provvedimenti di ordine pubblico [...]”*. A differenza di quanto previsto per gli impianti RIR, non si parla di area di rischio ma di distanze di attenzione, proprio perché per i rifiuti non è prevista un'analisi di rischio.

2.3.4 Normativa di prevenzione incendi

Gli aspetti che riguardano la prevenzione degli incendi sono strettamente legati al lavoro svolto dal Corpo Nazionale dei Vigili del fuoco (Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, s.d.); inizialmente il riferimento per la prevenzione incendi era costituito da un complesso sistema di regole, norme, e indicazioni varie basate soprattutto sull'esperienza sul campo fin dagli anni Ottanta.

Un primo passo, per garantire un adeguato livello di protezione in relazione alla sicurezza antincendio definito univocamente a livello nazionale, è rappresentato dall'individuazione di un elenco di 80 attività (dette *“attività soggette”*) considerate a maggior rischio di incendio e sottoposte perciò al controllo dei Vigili del Fuoco, riportate nell'allegato I del D.P.R 1° agosto 2011, n.151 (Decreto del Presidente della Repubblica, 2011). Il regolamento opera una sostanziale semplificazione e tiene conto dell'introduzione della SCIA⁴ (Segnalazione Certificata di Inizio Attività) sui procedimenti di competenza dei VVF (Corpo Nazionale dei Vigili Fuoco, s.d.) .Tra le diverse attività soggette associate a un maggior rischio incendio rientrano: “

- *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. [...]*

⁴ Dichiarazione amministrativa che deve essere presentata al Comando provinciale e che abilita all'esercizio di un'attività (nuova o in seguito a modifiche) ai soli fini antincendio.

- *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 [...]*”

Più in generale, le attività sono divise in tre categorie (A, B e C) in base alla semplicità della struttura e ad esse sono associati iter burocratici differenti a seconda della categoria a cui appartengono.

Una volta che viene presentata al Comando la SCIA e la documentazione necessaria, questo effettua dei controlli che, a seconda della categoria in cui rientra l'attività in questione, possono essere puntuali o a campione. Per le attività rientranti nelle categorie A e B il Comando, a richiesta dell'interessato, rilascia una copia del verbale dell'ispezione di controllo (visita tecnica) e questo è sufficiente per procedere; nel caso di attività appartenente alla categoria C, il Comando, a valle di un esito positivo dei controlli, rilascia il Certificato di Prevenzione Incendi (CPI).

Una seconda svolta significativa è stata rappresentata dalla promulgazione del Decreto Ministeriale del 03/08/2015, «*Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139*», noto come Codice di prevenzione incendi (Decreto del Ministero dell'Interno, 3 agosto 2015). Il Codice rappresenta una rivoluzione nel panorama normativo italiano perché raccoglie all'interno di un unico testo le regole di prevenzione incendi e fornisce al progettista un iter procedurale definito per il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza antincendio. Il Codice fornisce quindi una procedura standard da applicarsi in generale e individuata come una Regola Tecnica Orizzontale (di seguito RTO); in aggiunta, presenta una sezione che racchiude le Regole Tecniche Verticali (di seguito RTV), che sono invece delle disposizioni applicabili a una singola attività specifica. L'ultimo aggiornamento del Codice risale al 26 luglio 2022, attraverso un D. M. recante “*Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi per gli stabilimenti ed impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti*”, in vigore dal 9 novembre 2022 (Decreto del Ministero dell'Interno, 26 luglio 2022) da applicare a “*stabilimenti e impianti che effettuano stoccaggio dei rifiuti in via esclusiva o a servizio degli impianti di trattamento di rifiuti, esclusi i rifiuti inerti e radioattivi, nonché ai centri di raccolta di rifiuti di superficie superiore a 3,000 m²*”.

La Regola Tecnica Verticale relativa agli impianti di trattamento e stoccaggio rifiuti contiene innanzitutto una classificazione degli stessi, sia in base alla superficie lorda utile, nella quale rientrano tutte le aree di stoccaggio, lavorazione e le altre aree rimanenti, sia in relazione alle tipologie delle aree, che possono essere aree di stoccaggio rifiuti (al chiuso, all'aperto, a parete, in baia o bunker), aree a rischio specifico o aree di altro tipo. La Regola definisce la compartimentazione degli stoccaggi, che serve per assicurare che l'attività sia dotata di misure della gestione della sicurezza antincendio e che garantisce che, al momento dell'evento, le squadre antincendio e i relativi mezzi siano in grado di raggiungere le zone sensibili. Si riporta di seguito un estratto delle RTV, sezione V.10.5.2 “*Procedura per la determinazione tabellare della distanza di separazione*”:

1. *Le disposizioni del presente paragrafo si applicano agli stoccaggi all'aperto.*
2. *Ai fini della determinazione della distanza di separazione con il presente metodo tabellare valgono le condizioni di cui ai punti successivi.*
3. *L'altezza massima dell'accumulo di rifiuti sciolti non deve essere superiore a 4 metri. Nel caso di rifiuti imballati, il cumulo non deve avere un'altezza superiore a 4 metri*

oppure non deve essere costituito da più di 4 balle impilate verticalmente, a seconda della condizione più restrittiva. L'altezza dei cumuli deve in ogni caso essere compatibile con le condizioni di sicurezza e di stabilità degli stessi.

- 4. Il massimo quantitativo di rifiuti che può essere stoccato per singolo accumulo non deve essere superiore a 450 m³ per materiali aventi velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio rapida o ultrarapida e 1.000 m³ per materiali aventi velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio lenta o media.*
- 5. Lo stoccaggio di rifiuti sciolti privi di strutture di contenimento verticali (es. baie, pareti, ...) devono avere una inclinazione massima della superficie laterale non superiore a 45°.*
- 6. Le pareti della aree TSP e TSB devono avere una altezza maggiore di 1 metro rispetto all'altezza del cumulo di rifiuti e resistere alle sollecitazioni derivanti dall'azione di spinta prodotta dai cumuli di materiale stoccato.*
- 7. Eventuali oggetti o sporgenze delle opere da costruzione devono essere considerati ai fini dell'applicazione delle distanze.*
- 8. Deve essere garantita l'accessibilità ai soccorritori ad almeno un lato di ogni accumulo. La larghezza massima per ogni accumulo non deve essere superiore a 20 metri, qualora sia garantita l'accessibilità ai soccorritori ad entrambi i lati dell'accumulo; in caso di accessibilità garantita su un solo lato, larghezza massima per ogni accumulo non deve essere superiore a 10 metri.”*

L'ultimo aspetto da prendere in esame riguarda la normativa ambientale, regolamentata dal TUA.

2.3.5 Normativa autorizzativa ambientale

Si richiamano nel seguito i principali strumenti autorizzativi utilizzati nell'ambito della normativa ambientale. All'interno del TUA (Decreto legislativo n.152, 2006), infatti, vengono presentati diversi procedimenti e autorizzazioni che possono essere di natura preliminare o necessari all'esercizio di un impianto che, di norma, sono di competenza della Regione; in Piemonte, tuttavia, come in altre realtà italiane, l'incarico è stato attribuito alle Province, grazie al servizio di delega. Di seguito si riportano le principali procedure.

2.3.5.1 Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA)

L'AIA, Autorizzazione Integrata Ambientale, come definito dal art. 5, comma 1, lettera o-bis del D. Lgs. 152/2006, poi modificato dal D. Lgs. 46/2014 (Decreto legislativo n.46, 4 marzo 2014), è *“il provvedimento che autorizza l'esercizio di una installazione rientrante fra quelle di cui all'articolo 4, comma 4, lettera c), o di parte di essa a determinate condizioni che devono garantire che l'installazione sia conforme ai requisiti di cui al Titolo III-bis ai fini dell'individuazione delle soluzioni più idonee al perseguimento degli obiettivi di cui all'articolo 4, comma 4, lettera c). Un'autorizzazione integrata ambientale può valere per una o più installazioni o parti di esse che siano localizzate sullo stesso sito e gestite dal medesimo gestore. Nel caso in cui diverse parti di una installazione siano gestite da gestori differenti, le relative autorizzazioni integrate ambientali sono opportunamente coordinate a livello istruttorio [...]”*. Con il termine installazione, si intende una *“unità tecnica permanente, in cui sono svolte una o più attività elencate all'allegato VIII alla Parte Seconda e qualsiasi*

altra attività accessoria, che sia tecnicamente connessa con le attività svolte nel luogo suddetto e possa influire sulle emissioni e sull'inquinamento. È considerata accessoria l'attività tecnicamente connessa anche quando condotta da diverso gestore". Le condizioni imposte dall'AIA devono soddisfare la conformità ai requisiti della Direttiva IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control), cioè ai requisiti di una strategia comune a tutta l'Unione Europea introdotta per la prima volta nel 1996 al fine di controllare e prevenire l'inquinamento prodotto da complessi industriali.

L'AIA è definita "integrata" perché racchiude al proprio interno diverse valutazioni tecniche con l'obiettivo di stimare l'impatto di una certa attività su suolo, acqua e aria. Le attività soggette ad AIA sono definite all'interno dell'allegato VIII della Parte Seconda del D. Lgs. 152 del 2006; vengono citate le attività di competenza regionale o statale, tra cui, al punto 5, rientrano quelle relative alla Gestione dei rifiuti, che sono:

“ 5.1. *Lo smaltimento o il recupero di rifiuti pericolosi, con capacità di oltre 10 Mg al giorno, che comporti il ricorso ad una o più delle seguenti attività:*

- a) trattamento biologico;*
- b) trattamento fisico-chimico;*
- c) dosaggio o miscelatura prima di una delle altre attività di cui ai punti 5.1 e 5.2;*
- d) ricondizionamento prima di una delle altre attività di cui ai punti 5.1 e 5.2;*
- e) rigenerazione/recupero dei solventi;*
- f) rigenerazione/recupero di sostanze inorganiche diverse dai metalli o dai composti metallici;*
- g) rigenerazione degli acidi o delle basi;*
- h) recupero dei prodotti che servono a captare le sostanze inquinanti;*
- i) recupero dei prodotti provenienti dai catalizzatori;*
- j) rigenerazione o altri reimpieghi degli oli;*
- k) lagunaggio.*

5.2. *Smaltimento o recupero dei rifiuti in impianti di incenerimento dei rifiuti o in impianti di coincenerimento dei rifiuti:*

- a) per i rifiuti non pericolosi con una capacità superiore a 3 Mg all'ora;*
- b) per i rifiuti pericolosi con una capacità superiore a 10 Mg al giorno.*

5.3.

a) Lo smaltimento dei rifiuti non pericolosi, con capacità superiore a 50 Mg al giorno, che comporta il ricorso ad una o più delle seguenti attività ed escluse le attività di trattamento delle acque reflue urbane, disciplinate al paragrafo 1.1 dell'Allegato 5 alla Parte Terza:

- 1) trattamento biologico;*
- 2) trattamento fisico-chimico;*
- 3) pretrattamento dei rifiuti destinati all'incenerimento o al coincenerimento;*
- 4) trattamento di scorie e ceneri;*

- 5) *trattamento in frantumatori di rifiuti metallici, compresi i rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche e i veicoli fuori uso e relativi componenti.*
- b) *Il recupero, o una combinazione di recupero e smaltimento, di rifiuti non pericolosi, con una capacità superiore a 75 Mg al giorno, che comportano il ricorso ad una o più delle seguenti attività ed esclude le attività di trattamento delle acque reflue urbane, disciplinate al paragrafo 1.1 dell'Allegato 5 alla Parte Terza:*
- 1) *trattamento biologico;*
 - 2) *pretrattamento dei rifiuti destinati all'incenerimento o al co-incenerimento;*
 - 3) *trattamento di scorie e ceneri;*
 - 4) *trattamento in frantumatori di rifiuti metallici, compresi i rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche e i veicoli fuori uso e relativi componenti. Qualora l'attività di trattamento dei rifiuti consista unicamente nella digestione anaerobica, la soglia di capacità di siffatta attività è fissata a 100 Mg al giorno.*
- 5.3. *Discariche, che ricevono più di 10 Mg di rifiuti al giorno o con una capacità totale di oltre 25000 Mg, ad esclusione delle discariche per i rifiuti inerti.*
- 5.4. *Accumulo temporaneo di rifiuti pericolosi non contemplati al punto 5.4 prima di una delle attività elencate ai punti 5.1, 5.2, 5.4 e 5.6 con una capacità totale superiore a 50 Mg, eccetto il deposito temporaneo, prima della raccolta, nel luogo in cui sono generati i rifiuti.*
- 5.5. *Deposito sotterraneo di rifiuti pericolosi con una capacità totale superiore a 50 Mg.”*

Un requisito che deve essere soddisfatto al fine di ottenere un' AIA è l'utilizzo delle BAT (Best Available Technologies), cioè le migliori soluzioni tecniche impiantistiche, gestionali e di controllo in grado di garantire un elevato livello di protezione dell'ambiente. Le BAT sono state introdotte dal D. Lgs. 46 del 2014 (Decreto legislativo n. 46, 2014), emanato in attuazione della Direttiva 2010/75/UE, relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento).

2.3.5.2 *Procedura Ordinaria*

La procedura ordinaria deve essere richiesta dai soggetti che intendono realizzare nuovi impianti di recupero di rifiuti e le modalità di rilascio dell'autorizzazione in procedura ordinaria sono definite dall'articolo 208 del D. Lgs. 152/2006; all'interno della procedura ordinaria vengono riportati i termini e le prescrizioni che garantiscono, durante le fasi di realizzazione di gestione dell'impianto, una massima tutela per l'ambiente, per la sicurezza sul lavoro e per l'igiene pubblica. Per ottenerla, viene presentata una domanda alla Regione o all'Amministrazione competente (nella regione Piemonte sono competenti le province) che contiene il progetto dell'impianto e la documentazione tecnica per la sua realizzazione. Con riferimento al Piemonte, la Provincia individua il responsabile del procedimento e convoca la Conferenza dei servizi, che è composta da Responsabili degli uffici tecnici, rappresentanti di autorità d'ambito, dall'impresa e dagli Enti Locali dove si vuole realizzare l'impianto. La durata dell'autorizzazione è di 10 anni, e dev'essere modificata e aggiornata in caso di modifiche.

2.3.5.3 Procedura semplificata

Le procedure semplificate consentono attività di solo recupero di rifiuti individuati da specifiche norme tecniche emanate dal Ministero dell'Ambiente e vengono regolamentate dagli articoli 214 e 216 del D. Lgs. 152/2006. La scelta di attivare una procedura ordinaria o semplificata ricade sull'impresa, in base all'attività che intende svolgere; infatti, generalmente, le procedure semplificate riguardano piccole realtà che trattano una tipologia di rifiuto (ad esempio la carta, o il vetro) in quantità ridotte, la cui soglia massima è regolamentata per legge.

2.3.5.4 Valutazione di Impatto Ambientale (VIA)

Si è ritenuto opportuno citare anche la Valutazione di Impatto Ambientale, di seguito VIA, cioè un procedimento preliminare da avviare quando si superano determinate soglie espresse in termini di flussi giornalieri; si tratta un'autorizzazione preventiva richiesta per impianti di recupero che trattano rifiuti, non richiesta per la sola messa in riserva. Come definito dall' art. 183 del TUA, lettera aa) , per messa in riserva si intende una tipologia di stoccaggio di rifiuti espressamente finalizzata al recupero: *“stoccaggio: le attività di smaltimento consistenti nelle operazioni di deposito preliminare di rifiuti di cui al punto D15 dell'allegato B alla parte quarta del presente decreto, nonché le attività di recupero consistenti nelle operazioni di messa in riserva di rifiuti di cui al punto R13 dell'allegato C alla medesima parte quarta”*, e la voce R13, a sua volta la definisce: *“Messa in riserva di rifiuti per sottoporli ad una delle operazioni per sottoporli a una delle operazioni indicate nei punti da R1 a R12 (escluso il deposito temporaneo, prima della raccolta, nel luogo in cui sono prodotti)”*.

La principale differenza tra la VIA e le altre autorizzazioni ambientali di cui si è parlato, è che la VIA è un'autorizzazione di tipo preventivo che viene richiesta per valutare gli effetti che la realizzazione di un'opera può avere sull'ambiente, sulla salute e sul benessere umano, in modo da poter identificare le misure atte a prevenire, eliminare o circoscrivere gli impatti negativi prima che questi si verifichino concretamente.

Al contrario, AIA, procedure ordinarie e semplificate, sono previste in una fase successiva, quando l'impianto è ormai costruito, al fine di autorizzarne l'attività. Le diverse tipologie di procedure presentate finora, preventive (VIA) e autorizzative, fanno riferimento a soglie differenti; perciò, capita che un impianto possa essere soggetto a VIA ma non alle procedure autorizzative citate precedentemente, oppure a entrambe le tipologie. Nel caso in cui la valutazione di impatto ambientale debba essere affiancata da un'autorizzazione all'esercizio, ad esempio di tipo AIA, all'interno della regione Piemonte è prevista l'attivazione di un Provvedimento Autorizzatorio Unico regionale (PAUR) che ha l'intento di semplificare l'iter autorizzativo.

Un'interessante osservazione riguarda le unità di misura utilizzate all'interno della normativa antincendio e il confronto con quanto riportato invece all'interno delle procedure ambientali. Nella prima, si parla in termini di volume e di lunghezze caratteristiche; all'interno delle normative ambientali invece le unità di misura utilizzate sono in termini di flussi di quantità di rifiuti, ad esempio in AIA si parla di megagrammi (tonnellate) al giorno in entrata e in uscita dallo stabilimento; ancora, il quantitativo massimo in stoccaggio (giacenza) che viene autorizzato al gestore dell'impianto può essere espresso come tonnellate giornaliere o assolute, in base alla procedura di gestione. Questo ulteriore limite rappresentato dall'incoerenza tra la normativa antincendio e la normativa ambientale è indice di quanto è complessa la legge in quest'ambito, e di quanto sia difficile anche un dialogo tra le differenti procedure, che invece sarebbe molto utile per trovare una strada unificata.

2.4 Considerazioni Ulteriori

L'intento del presente capitolo è quello di evidenziare la complessità della normativa che riguarda gli impianti che gestiscono rifiuti. Gli aspetti che riguardano la normativa antincendio sono di competenza dei Vigili del Fuoco, gli aspetti ambientali possono invece essere gestiti da Arpa Piemonte mentre gli aspetti di normativa antincendio specifici per gli impianti di rifiuti e quindi la relativa documentazione (PEI e PEE) possono coinvolgere diversi Enti, la Prefettura e il gestore della ditta considerata. Per citare un esempio, nel 2018 viene emanata la Legge di conversione del cosiddetto "Decreto sicurezza" (Decreto legislativo n.152, 2006), che impone ai gestori di impianti di stoccaggio e lavorazione dei rifiuti l'obbligo di redigere un Piano di Emergenza Interna e di inviare alla Prefettura locale le informazioni utili per la successiva elaborazione del Piano di Emergenza Esterna. A questo punto però i gestori e i professionisti coinvolti in questo genere di attività iniziano a sollevare delle questioni perché all'interno del Decreto non sono specificate le informazioni da inviare alle Prefetture o le modalità di invio dei documenti. Solo dopo, nel gennaio del 2019, con la pubblicazione delle Linee guida e nel febbraio dello stesso anno, con la Circolare recante le Disposizioni attuative dell'art.26-bis, sono state fornite informazioni più dettagliate circa gli elementi da inviare in Prefettura per la predisposizione del PEE. Successivamente, è stato introdotto il metodo ad Indici e sono stati messi a disposizione dei formati da prendere come esempio per la predisposizione dei PEE, tuttavia questo è avvenuto nel 2021, ben tre anni dopo la Legge di conversione che obbligava la redazione di PEI e PEE. I privati e le aziende coinvolte, ma anche gli Enti con cui essi collaborano si trovano quindi in una situazione difficile dove da una parte devono adempiere a degli obblighi normativi mentre dall'altra non hanno gli strumenti per farlo; in questo caso alcune Prefetture hanno preso l'iniziativa e hanno iniziato a richiedere delle informazioni generiche ai gestori, ma son passati diversi anni prima di ricevere istruzioni più precise a riguardo e unificate a livello nazionale.

L'esempio precedente riguarda uno dei tanti aspetti in capo ai gestori di rifiuti, inoltre ciascun aspetto viene gestito da Enti differenti che non sempre collaborano e condividono le proprie considerazioni; una mancata sinergia e una mancata collaborazione possono portare a delle mancanze o a trascurare degli aspetti importanti che magari sono in parte di competenza di un Ente e in parte di un altro.

Con queste ultime considerazioni, si è cercato di mettere in luce alcune delle difficoltà relative alla gestione degli impianti di trattamento e stoccaggio dei rifiuti, da ricercarsi sia in una legislazione molto ampia e in continuo cambiamento, sia nel coinvolgimento di personale proveniente da ambienti differenti e a volte non sufficientemente coordinati.

Conclusa questa prima parte di carattere generale, nel prossimo capitolo sarà presente una sezione dedicata al ruolo di Arpa, l'agenzia regionale per la prevenzione ambiente; si entrerà inoltre nel merito delle relazioni tecniche e in particolare verranno presentati diversi casi reali di incendi occorsi, dai quali si è preso spunto per effettuare le simulazioni e per definire la tipologia di eventi di interesse.

3. Attività di Arpa Piemonte in materia di impianti di gestione rifiuti, relazione tecniche e strumentazione per la verifica della qualità dell'aria

3.1 Ruolo di Arpa in materia di rifiuti

Come anticipato nell'introduzione, Arpa è l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte, ed è stata istituita con la legge regionale 13 aprile 1995, n.60, sostituita dalla Legge regionale n. 18 del 26 settembre 2016, *“al fine di assicurare efficacia all'esercizio dell'azione conoscitiva e di controllo pubblico della qualità dell'ambiente a supporto delle politiche di sostenibilità ambientale e di prevenzione sanitaria a tutela della salute pubblica, [...]”*.

All'articolo 2 della medesima legge tra le finalità dell'Arpa è previsto che:

“[...] 3. L'ARPA svolge le attività di controllo, di supporto e di consulenza tecnico-scientifica e le altre attività utili alla Regione, agli enti locali anche in forma associata, nonché alle aziende sanitarie per lo svolgimento dei compiti loro attribuiti dalla legge nel campo della prevenzione e della tutela ambientale. [...]”

Si tratta di un Ente presente su tutto il territorio regionale che opera attraverso quattro Dipartimenti territoriali^[46], corrispondenti ai seguenti quattro quadranti:

- SC Dipartimento territoriale del Piemonte Nord Ovest, che si occupa del territorio in provincia di Torino;
- SC Dipartimento territoriale di Piemonte Sud Est associato alle province di Alessandria e Asti;
- SC Dipartimento territoriale del Piemonte Sud Ovest, relativo al territorio della provincia di Cuneo;
- SC Dipartimento territoriale del Piemonte Nord Est, in relazione alle province di Biella, Novara, Verbano Cusio Ossola e Vercelli.

I diversi Dipartimenti sono dislocati sul territorio per un'ottimizzazione delle attività, ma seguono delle linee organizzative comuni, condividono le relative informazioni e collaborano in maniera sinergica per un'efficace pianificazione e realizzazione degli interventi. Arpa svolge diverse attività istituzionali di natura tecnico-scientifica, come previsto dalla Legge regionale n. 18 ^[40], che al capo II. *“Funzioni”* riporta: “

- a) *attività di controllo ambientale [...]*
- b) *attività di supporto e assistenza agli enti [...]*
- c) *attività di raccolta ed elaborazione dei dati acquisiti [...]* “

In merito agli impianti di trattamento rifiuti, Arpa Piemonte effettua mediamente 500 controlli all'anno attraverso sopralluoghi in campo e verifiche aggiuntive nel caso di produttori iniziali di rifiuti speciali. Le attività di supporto si esplicano, ad esempio, attraverso la collaborazione con le autorità competenti nell'ambito delle istruttorie ambientali quali AIA, Procedure ordinarie e Procedure semplificate, a cui si è fatto riferimento nel precedente capitolo. Infine, tramite la sezione Regionale del Catasto Rifiuti, Arpa elabora i dati estrapolati dalle dichiarazioni MUD (Modello Unico di Dichiarazione ambientale) sulla produzione e la gestione dei rifiuti nel territorio regionale e supporta la Regione per le azioni di pianificazione e di controllo. Tutti i gestori di rifiuti, che sono migliaia, presentano una dichiarazione sui rifiuti prodotti che sono trattati o gestiti, e queste vengono elaborate da una sezione regionale che si

occupa anche della verifica della parte documentale, generalmente caricata su piattaforme informatiche. Negli anni l'attività di Arpa è tenuta sempre più in considerazione; infatti, spesso la Regione chiede il supporto di Arpa per il piano regionale riguardante rifiuti urbani e rifiuti speciali, ed il parere dei tecnici e degli esperti che lavorano in Arpa è diventato in alcuni casi vincolante per legge, dando a questo ente un ruolo tecnico riconosciuto.

In aggiunta alle attività sopracitate, che sono di natura "ordinaria", Arpa si occupa anche delle emergenze territoriali ambientali, per le quali esiste una Procedura tecnica dedicata che viene continuamente aggiornata^[6]. La procedura si applica a tutte le situazioni ambientali emergenziali e ad eventi incidentali di origine antropica o di origine naturale che interagiscono con infrastrutture antropiche (ad esempio, nel caso di scosse sismiche, alluvioni o frane che possono compromettere un impianto in funzione). Arpa garantisce il proprio intervento in emergenza attraverso un servizio di pronta disponibilità la cui gestione avviene a livello di Dipartimento Territoriale e il servizio può essere attivato sia su richiesta di soggetti pubblici, sia con la chiamata della Centrale Operativa del 112 (numero unico per le emergenze).

Tra le diverse situazioni di emergenza citate all'interno della Procedura (Direttore Tecnico Arpa Piemonte, 2020) rientrano, ad esempio, sversamenti di materiale inquinante pericoloso per l'ambiente, emissioni tossiche e/o infiammabili, esplosioni o incendi; perciò, si fa riferimento anche all'emergenza di incendio all'interno di impianti che gestiscono rifiuti.

3.2 Banca dati e attività di Arpa in riferimento ad incendi negli impianti di gestione dei rifiuti

Grazie al servizio di pronto emergenze, Arpa ha potuto creare una banca dati (Arpa Piemonte, 2022) che raccoglie tutte le tipologie di segnalazioni pervenute ad Arpa da Marzo 2014 ad oggi e che viene continuamente aggiornata (sempre in riferimento al territorio regionale del Piemonte). La banca dati raccoglie oltre 330 casi di segnalazioni legate ad incendi, ad opera di privati cittadini, impiegati o di altri Enti di soccorso. Di queste circa il 15% sono segnalazioni di incendi all'interno di impianti di trattamento rifiuti, il 5% sono casi di incendi di cui non sono riportate ulteriori informazioni riguardo luogo e tipologia di combustibile coinvolto e la restante parte riguarda segnalazioni di incendi o di situazioni di disagio ad essi legate (quali ad esempio difficoltà a respirare, inquinamento olfattivo persistente o altro genere di malessere legato alla presenza dei fumi e degli inquinanti in essi presenti); in quest'ultima categoria rientrano anche tutte le chiamate effettuate da privati cittadini per avere informazioni o per richiedere una verifica della qualità dell'aria in una zona di interesse in seguito a eventi di questo genere. Di seguito, in figura 3.1 si riporta un istogramma nel quale sono rappresentate le segnalazioni pervenute al numero di emergenza di Arpa dal 2015 al 2021⁵; in aggiunta, si è scelto di riportare anche quante di queste segnalazioni riguardano incendi all'interno di impianti di gestione rifiuti⁶.

⁵ Si è scelto di escludere i dati relativi agli anni 2014, in quanto presenti a partire dal mese di Marzo, e del 2022, per le stesse ragioni

⁶ È probabile che il numero di incendi all'interno di impianti di rifiuti possa essere superiore e che quindi questo dato risulti inferiore rispetto a quanto riportato in altre fonti.

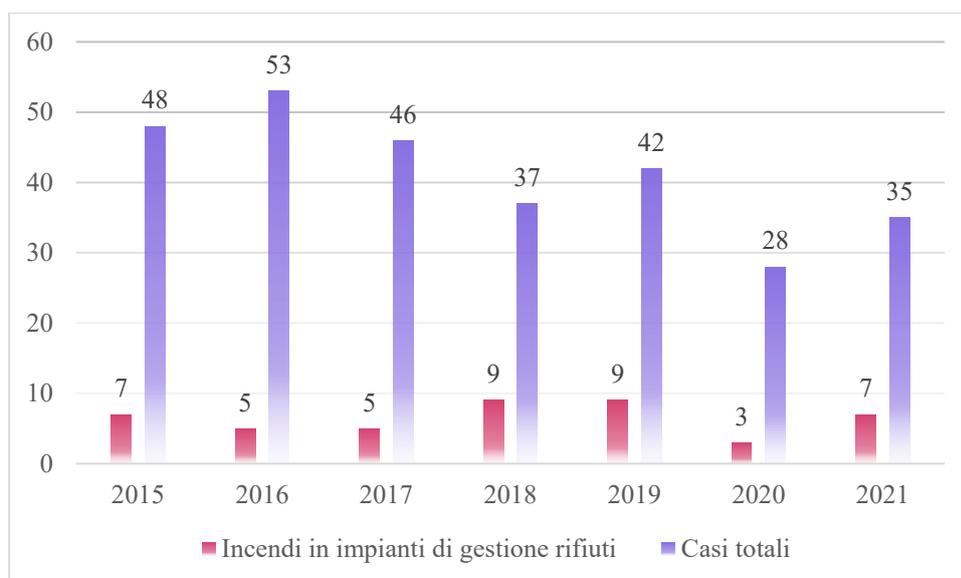


Figura 3. 1 Istogramma rappresentativo degli incendi segnalati ad Arpa attraverso il servizio emergenze dal 2015 al 2021 (Arpa Piemonte, 2022).

Questi dati evidenziano un problema importante che è stato preso in considerazione anche a livello giudiziario su scala nazionale, come dimostrato dall'interessamento della Commissione parlamentare di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti e su illeciti ambientali ad esse correlati, con la quale si è scelto di aprire questo elaborato.

Per far fronte all'emergenza degli incendi negli impianti di gestione rifiuti, nel giugno 2018 si è tenuto un workshop con sede a Torino organizzato dalla Regione Piemonte, da Arpa Piemonte e in collaborazione con l'Ordine degli ingegneri della Provincia di Torino dal titolo **“Incendi in impianti di trattamento rifiuti. Legalità e pianificazione per la prevenzione”**. All'incontro hanno preso parte diversi personaggi importanti quali il Presidente della Regione Piemonte, l'Assessore Regionale dell'Ambiente, il Prefetto di Torino e l'Onorevole Chiara Braga, Presidente della Commissione di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti e su illeciti ambientali ad esse correlati nella XVII Legislatura; inoltre, hanno preso parola esperti in materia di legalità e di pianificazione per la prevenzione provenienti da diverse regioni d'Italia, nonché esponenti del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco.

Da questo evento sono emerse quattro diverse casistiche legate al contesto in cui gli incendi si sono sviluppati:

- incendi connessi alla cattiva gestione dell'impianto nei quali emerge un aspetto colposo certo e non si esclude l'aspetto doloso;
- incendi collegabili al ciclo di gestione impiantistico non di natura dolosa ma con probabile aspetto colposo;
- incendi di entità lieve, comunque, riconducibili a una scarsa attenzione;
- incendi dovuti a violazioni specifiche di norme sulla sicurezza.

Come esposto durante la presentazione tenutasi nel corso del Workshop, nella quale hanno preso parola anche Angelo Robotto, Giuseppe Battarino e Cosimo Pulito, la cattiva gestione degli impianti spesso è riconducibile allo svolgimento di attività illecite di natura speculativa, può succedere infatti che i trattamenti non vengano condotti correttamente e la sequenza delle operazioni che dovrebbero portare al recupero o al corretto smaltimento del rifiuto non venga

completata. L'ideale sarebbe riuscire ad applicare un'Economia dei rifiuti Circolare, con la possibilità di collocare sul mercato l'End of waste dei rifiuti dopo che sono stati sottoposti ai giusti processi di trattamento anche se purtroppo, siamo ancora lontani dal raggiungimento di questo obiettivo.

Durante il medesimo workshop, attraverso l'intervento del Direttore Generale Arpa Piemonte Angelo Robotto, sono state presentate le attività svolte da Arpa esclusivamente connesse agli incendi negli impianti di rifiuti. Esistono tre fasi di attività differenti con riferimento all'evento incidentale, che sono fase preventiva, operativa e post-operativa, approfondite di seguito.

3.2.1 Fase preventiva

La fase preventiva si articola principalmente in due settori:

- supporto tecnico/istruttorio alle Autorità Competenti in fase autorizzativa, i rinnovi/riesami e di modifica sostanziale di impianto; dove gli esponenti dell'Agenzia partecipano attivamente alle fasi istruttorie/autorizzative e fornendo uno strumento di controllo e prevenzione efficace;
- controllo ordinario degli impianti; si tratta di un'attività ispettiva durante la quale il personale dell'Agenzia collabora col personale dell'impresa soggetta ai controlli e, a volte, con altri organismi (ad esempio i V.V.F.).

3.2.2 Fase operativa dell'emergenza incendi

Come previsto dalla Legge regionale n. 18 precedentemente citata, Arpa Piemonte si occupa di intervenire fornendo supporto tecnico durante la gestione di emergenze ambientali legate all'attività antropica, quali incendi che si sviluppano all'interno di impianti di trattamento rifiuti. Arpa è organizzata in squadre di intervento che vengono attivate in seguito all'emergenza, le quali effettuano innanzitutto una valutazione tecnica preliminare acquisendo informazioni utili per la gestione dell'emergenza (dati meteorologici e di qualità dell'aria, informazioni sugli stabilimenti coinvolti, sostanze pericolose presenti o che possono generarsi durante la combustione, inquadramento territoriale e individuazione di recettori sensibili quali scuole, centri abitati, ...). Successivamente, il gruppo di intervento preleva dei campioni delle diverse matrici ambientali (acqua, suolo e aria) potenzialmente coinvolte nell'incidente, effettuando sia misurazioni istantanee sia prelievi da analizzare successivamente in laboratorio. L'obiettivo è individuare nel più breve tempo possibile gli agenti pericolosi che possono entrare in contatto con l'ambiente causando dei danni ad esso e alla popolazione, sia in maniera diretta che no.

3.2.3 Fase post-operativa dell'emergenza incendi

In fase post-operativa si effettuano campionamenti di altre matrici ambientali (come suolo o acque) coinvolte nell'evento incidentale per avere una caratterizzazione più completa delle conseguenze. Per quanto concerne la matrice suolo, si preleva uno strato superficiale di 2 cm nei punti di maggior ricaduta, per la determinazione dell'eventuale presenza di PCDD e PCDF⁷. A seconda dei casi, è possibile analizzare anche specifiche matrici sanitarie (ortaggi, prodotti

⁷ PoliCloroDibenzoDiossine (PCDD) e PoliCloroDibenzoFurani (PCDF); sono due classi di composti chimici aromatici clorurati tossici e cancerogeni, molto pericolosi per l'ambiente e per la salute umana.

alimentari come frutta, latte, uova e carni) o le acque di spegnimento, qualora si ritenga opportuno verificare che queste non siano state contaminate da PCDD/F.

È anche possibile collocare una stazione mobile per il rilevamento della qualità dell'aria nel caso di eventi di durata prolungata, per l'ulteriore acquisizione di informazioni utili alla valutazione dell'impatto ambientale.

Quindi, per riassumere, le attività di post-emergenza si articolano in:

- analisi di laboratorio (per l'ottenimento di risultati analitici);
- stima e valutazione degli effetti ambientali e monitoraggio dell'evoluzione post-incidentale;
- supporto tecnico al fine di ripristinare le condizioni ambientali precedenti all'evento incidentale;
- redazione di una relazione tecnica sull'evento e su quanto emerso dai rilievi e condivisione dei risultati con gli Enti interessati;
- pubblicazione delle informazioni attraverso il sito web o mediante canali di comunicazione alternativi, al fine di rendere disponibili i fatti a chiunque voglia approfondire l'argomento.

In aggiunta, spesso emerge la necessità di effettuare ulteriori indagini ed ispezioni per comprendere la dinamica dell'eventuale reato e valutare se si tratta di episodi ricorrenti o meno in specifici contesti.

3.3 Strumentazione

Le informazioni riportate di seguito sono state ricavate dalle *“Linee guida SNPA per la gestione delle emergenze derivanti da incendi”* – Delibera del Consiglio SNPA⁸ (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, 2021); le foto invece si riferiscono alla strumentazione in possesso di Arpa Piemonte, Dipartimento territoriale di Torino, scattate durante l'esperienza di tirocinio finalizzato alla stesura della tesi.

La strumentazione utilizzata in campo per l'analisi delle matrici ambientali può essere a lettura diretta o a lettura indiretta. Gli strumenti a lettura diretta sono ad esempio il rilevatore multigas e le fiale colorimetriche a lettura diretta, che danno una risposta quasi istantanea fornendo tuttavia valori approssimativi (misure qualitative). Gli strumenti a lettura indiretta sono invece i canister e i campionatori ad alto e basso volume, i quali prelevano un certo volume di aria che poi viene trasportato e analizzato in laboratorio; non forniscono alcun valore istantaneo al momento dell'incendio e hanno tempi di restituzione da qualche ora a qualche giorno, tuttavia forniscono dati quantitativi, con una precisione maggiore rispetto ai metodi diretti, e sono utili soprattutto durante le fasi di post emergenza o nell'individuazione di eventuali responsabilità.

Per capire quali strumenti utilizzare durante l'emergenza, quando si arriva sul luogo dell'evento, o se possibile preventivamente, è importante fare un ragionamento sul tipo di materiali/rifiuti coinvolti e su quali sostanze possono derivare dal processo di combustione. Per la rilevazione dei gas di combustione è possibile utilizzare un rilevatore multigas, che può

⁸ SNPA è il Sistema Nazionale per la Protezione Ambiente istituito con la Legge 28 giugno 2016, n.132 *“Istituzione del Sistema Nazionale a rete per la protezione dell'ambiente e disciplina dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale”*.

essere equipaggiato con diversi sensori (ad esempio il sensore PID, CO, CH₄) oppure delle fiale colorimetriche scelte appositamente sulla base delle sostanze volatili che si ipotizza si possano essere sviluppate analizzando lo scenario. Di norma, le rilevazioni vengono effettuate nelle zone limitrofe, all'esterno della cosiddetta "zona rossa" circoscritta dai VVF, in prossimità di zone abitate, con presenza di bersagli sensibili quali scuole, luoghi e centri affollati, ecc., anche seguendo la direzione dei fumi di combustione che dipende dalla direzione del vento.

La misura degli inquinanti in aria è particolarmente difficile, specie se paragonata a quanto avviene per le matrici suolo e acqua, questo a causa dell'elevato numero di gas e vapori presenti; ad esempio, durante un incendio la composizione dei fumi e la tipologia di inquinanti dipende da molte variabili, quali il tipo di materiale, l'apporto di ossigeno durante la combustione, le temperature raggiunge, che influenzano anche la risalita dei fumi in atmosfera, la loro dispersione e, conseguentemente, l'area di ricaduta. Secondo quanto riportato nell'Allegato IV "Matrice aria" alla Procedura Tecnica per la Gestione delle Emergenze Ambientali (Direttore Tecnico Arpa Piemonte, 2020), solitamente durante un incendio vengono prodotti CO, CO₂, Particolato, COV (Composti Organici Volatili), H₂S, SO₂, NH₃, HCN, HCl, NO₂, CH₂CHCHO, COCl₂, e, in aggiunta, altre sostanze come i microinquinanti organici quali PCDD/PCDF, PCB⁹, metalli, ecc. In questi casi, è molto importante sapere come scegliere la giusta strumentazione, perciò i tecnici Arpa ricevono una formazione adeguata alla gestione di emergenze simili. Per avere un'idea di quali sono gli strumenti a disposizione e di come funzionano, si riporta di seguito una breve descrizione dei diversi strumenti a disposizione di Arpa Piemonte.

3.3.1 Rilevatore multigas

Un rilevatore multigas è uno strumento portatile utilizzato per il monitoraggio delle concentrazioni di gas e vapori presenti nell'aria in continuo, nato per monitorare l'esposizione dei lavoratori in ambienti di lavoro e in ambienti confinati. In figura 3.2 e in figura 3.3 sono rappresentati alcuni tra i rilevatori a disposizione dei Dipartimenti territoriali di Arpa Piemonte.

⁹ PCB, PoliCloroBifenili Si tratta di una classe di composti organici la cui struttura è assimilabile a quella del bifenile nel quale però gli atomi di idrogeno sono sostituiti con atomi di cloro; sono sostanze tossiche e persistenti difficilmente degradabili e riconosciute tra gli inquinanti organici più persistenti in ambiente (Arpa, s.d.)



Figura 3. 2 Vista frontale e laterale del rilevatore multigas Dräger X-am® 7000; dispositivo portatile che permette una misura continua e simultanea di massimo cinque gas, vapori tossici o combustibili, con pompa incorporata.



Figura 3. 3 Differenti sensori e apparecchiature utilizzati per il monitoraggio della qualità dell'aria. Nello specifico, si ha: a) Monitor portatile per la qualità dell'aria serie 500, compatibile con diverse testine intercambiabili che possono misurare fino a 16 diversi inquinanti, tra cui PM_{2,5}, PM₁₀, CO, CO₂, NO₂, VOC, O₃, SO₂, H₂S e altri; può essere usato per il monitoraggio in continuo e collegato a un controller esterno, allarmi o sistemi di gestione di un edificio; b) Testine intercambiabili del monitor series 500; c) Monitor series 500 con la testina montata, in funzione; d) Fotoionizzatore portatile TIGER con tecnologia PID brevettata da ION Science® per la misurazione dei COV, ha un intervallo di rilevamento dinamico da 0 a 20 mila ppm, ricaricabile, con batterie al litio; e) Rilevatore di gas tossici e ossigeno portatile (in figura è in carica sul supporto).

Questi strumenti sono leggeri e facilmente trasportabili, e possono avere sensori elettrochimici, a infrarossi, catalitici o a fotoionizzazione, grazie ai quali viene rilevata la presenza delle seguenti sostanze:

- idrocarburi, sia per esplosività che per tossicità;
- monossido di carbonio;
- ammoniaca;
- solfuro di idrogeno;
- altri (escluso H₂).

I rilevatori sono strumenti robusti, previsti di un rivestimento antiurto, impermeabili all'acqua, e generalmente certificati ATEX¹⁰, cosa che permette di poterli usare anche in ambienti potenzialmente esplosivi.

Tra i vantaggi dell'utilizzo di tali apparecchiature si hanno l'acquisizione di misure di gas e vapori inorganici specifici, possibilità di montare fino a 6 sensori indipendenti per strumento, impostazione di allarmi basati su soglie TLV¹¹ e acquisizione di valori in continuo con possibilità di associare a determinate soglie degli allarmi specifici (di tipo visivo o sonoro). D'altra parte, la strumentazione ha costi elevati dovuti proprio alla variabilità e alla poca durata dei sensori che possono essere montati sull'apparecchio, e, in aggiunta, sono necessarie frequenti calibrazioni con gas multistandard.

3.3.2 Fiale colorimetriche a lettura diretta

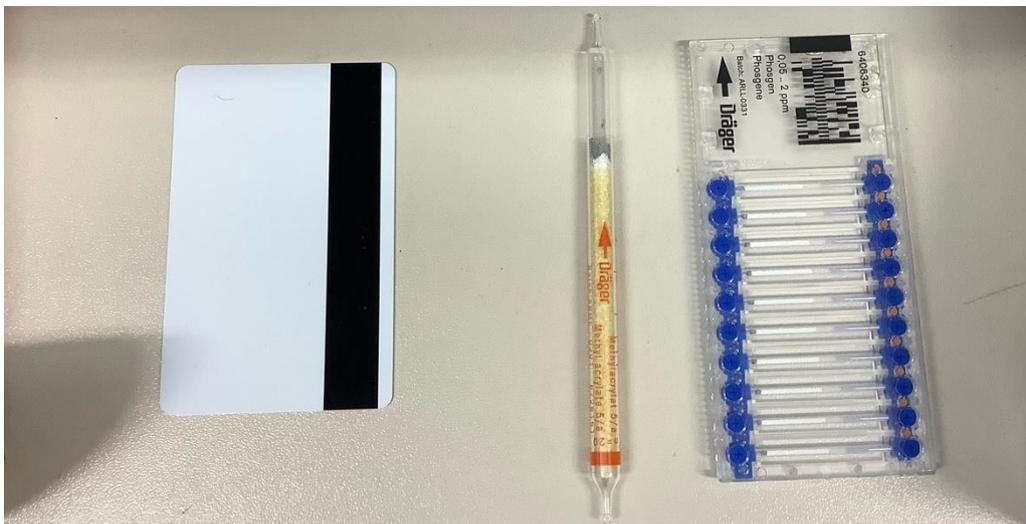


Figura 3. 4 Fiale Dräger, singola e kit, affiancate da una tessera badge (per avere un riferimento sulle relative dimensioni).

Si tratta di fiale di vetro contenenti un reagente chimico specifico a seconda del gas che si vuole

¹⁰ ATEX fa riferimento a due Direttive UE, la 2014/34/UE e la 1999/92/CE che regolano le modalità di gestione delle attrezzature e dei luoghi di lavoro a rischio di esplosioni.

¹¹ TLV, Threshold Limit Value, sono valori di concentrazione di sostanze aerodisperse, più o meno tossiche, che possono essere di diversi livelli ai quali corrispondono diversi effetti dannosi in riferimento alla salute dei lavoratori.

rilevare, la cui concentrazione è indicata direttamente su una scala graduata presente sulla fiala (come si può osservare in figura 3.4). Sono associate all'uso di una pompa di campionamento che può essere manuale o automatica, la quale aspira un volume predefinito di aria ambiente che, una volta all'interno della fiala, reagisce opportunamente segnalando l'eventuale presenza della sostanza ricercata. Le fiale sono dette colorimetriche proprio perché la reazione chimica comporta una modifica del colore del reagente (viraggio), che è sintomo di una positività alla presenza del composto. L'utilizzo di questi sistemi è molto semplice e permette di avere una misura immediata sia di gas che di vapori di sostanze organiche e inorganiche in pochi minuti; d'altra parte, questo comporta degli svantaggi, tra cui possibili interferenze nelle misurazioni che portano a incertezze fino al 30%, sensibilità massima nell'ordine dei ppm e necessità di correggere il dato rilevato per temperatura, pressione, umidità; senza contare che le fiale sono soggette a scadenza dopo uno/ tre anni dal confezionamento, se opportunamente conservate. In alternativa sono disponibili anche dei kit di fiale colorimetriche multigas, che consentono l'individuazione di più sostanze contemporaneamente, riducendo notevolmente i tempi di misura richiesti rispetto all'utilizzo della singola fiala. I kit non presentano una scala graduata di lettura in ppm, ma la loro lunghezza viene suddivisa in tre zone in base ai valori limite individuati per i luoghi di lavoro, che consentono una lettura del tipo: concentrazione non critica, concentrazione critica, concentrazione molto critica. Dopo il loro utilizzo, sia le fiale singole che i kit devono essere smaltiti opportunamente, in modo analogo a quanto accade ai reagenti chimici di laboratorio.

3.3.3 *Campionatori canister*

I campionatori canister (figura 3.5) sono costituiti da un contenitore in acciaio sottovuoto con una valvola la cui apertura permette all'aria ambiente di riempire il contenitore a causa della differenza di pressione, finché la pressione interna non eguaglia quella esterna, raggiungendo una condizione di equilibrio. Si tratta di sistemi di campionamento attivi e la fase di aspirazione dura dai 10 ai 30 secondi circa, in base al grado di apertura della valvola; è anche possibile adottare l'utilizzo di riduttori di flusso, per avere un tempo di campionamento maggiore, impostando la portata desiderata. Una volta prelevato il campione, il canister viene trasportato in laboratorio, che fornisce i risultati nell'arco di qualche giorno.



Figura 3. 5 Campionatori Canister del volume di 6 litri, vuoti, disponibili presso la sede di Arpa NO.

I risultati possono essere influenzati da molte variabili, quali l'altezza di campionamento, le condizioni atmosferiche e anemologiche o la vicinanza con fonti emissive non connesse all'evento incidentale. Inoltre, l'utilizzo dei canister non è adatto in presenza di gas aggressivi, fortemente acidi o basici, o in presenza di aria ad elevata polverosità, che contiene particelle disperse.

3.3.4 Campionatore ad alto volume Echo-Puf

I campionatori ad alto volume vengono utilizzati quando all'interno della sostanza combustibile sono presenti dei precursori, cioè sostanze clorurate che giustificano l'eventuale presenza di alcuni composti tossici e/o cancerogeni che è importante monitorare. Sono degli strumenti ingombranti, rappresentati nella foto in figura 3.6, alti più di un metro, utilizzati in caso di incendi significativi con una durata prevista superiore alle sei ore, a causa dei tempi di campionamento molto lunghi.



Figura 3. 6 Campionatore ad alto volume Echo-Puf.

I composti di interesse, che possono svilupparsi a partire dalla combustione dei cosiddetti “precursori”, appartengono alla classe delle diossine e dei furani (PCDD e PCDF), insieme alla classe degli idrocarburi policiclici aromatici (IPA); eventualmente, a seconda dei casi è possibile monitorare la presenza di altre sostanze, come i PCB, le polveri e il particolato, compresi i metalli. Il metodo di campionamento con campionatore ad alto volume comporta l'utilizzo di tecniche e strumentazione particolari; perciò, è importante che siano utilizzati da personale adeguatamente formato.

Si tratta di metodologie che richiedono degli investimenti sia in termini di tempo che di denaro, il campionamento infatti dura dalle 6 alle oltre 24 ore, e per ottenere i risultati dal laboratorio competente possono volerci anche quattro giorni lavorativi; perciò, se viene scelto male il punto di campionamento o se si commettono degli errori durante la procedura, viene completamente annullato tutto il lavoro e il campione non è più di alcuna utilità.

Il volume raccolto deve essere elevato per permettere di avere una quantità sufficiente di polveri aerodisperse, dell'ordine della decina di milligrammi, in modo da raggiungere i limiti di rilevabilità (si parla di ordini di grandezza di 10 fg/m^3 nel caso di PCDD/PCDF). Il campione di aria passa attraverso un filtro a membrana, costituito da microfibre di vetro o quarzo, sulle quali si deposita il particolato; si sceglie proprio questa tipologia perché questi filtri presentano elevata capacità di carico e basso rischio di intasamento. Per la raccolta degli IPA si utilizza solo un filtro a membrana, mentre per le diossine viene messa in serie una spugna cilindrica in schiuma poliuretana (PUF) capace di assorbire diossine e furani che possono sfuggire al filtro essendo molecole e non particolato. Per questa tipologia di composti (PCDD/PCDF) non sono ancora previsti dei limiti di legge; quindi, in genere si fa un confronto con i dati di fondo, cioè i dati dell'aria ambiente in condizioni normali, senza la presenza di incendi o altri eventi particolari.

3.3.5 Piattaforma mobile

Si tratta di un furgoncino equipaggiato con apposita strumentazione (può variare in base all'emergenza considerata); essendo un veicolo può essere spostato facilmente, ma necessita di un'alimentazione di corrente continua; perciò, può essere posizionato in prossimità di edifici pubblici (ad esempio scuole, stazioni di polizia) o di luoghi dov'è disponibile un'energia sufficiente ad alimentarlo (circa 2 kW).



Figura 3. 7 Piattaforma mobile per il monitoraggio della qualità dell'aria.

3.4 Casi di incendi occorsi

Nel corso del tirocinio sono stati esaminati alcuni casi di incendi, di questi, si sono scelti tre casi esemplificativi che verranno descritti in seguito. I primi due casi di incendio presentati, Incendio 1 e Incendio 2, sono avvenuti nella stessa ditta, di seguito Ditta 1, in provincia di Alessandria, a distanza di un paio di mesi l'uno dall'altro. Entrambi si sono sviluppati nella stessa località, in un'area di una piazzola all'aperto detta Piazzola Ecologica, nella quale era presente un macchinario utilizzato per ridurre di pezzatura i rifiuti ingombranti quali sedie, oggetti d'arredamento, e altri, senza una successiva compressione, ma lanciando gli scarti direttamente sulla piazzola. In questa piazzola erano quindi presenti dei cumuli di rifiuti disordinati e triturati, composti da fibre di tessuto, trucioli di legno, plastiche di vario genere, e altri materiali misti; inoltre si può immaginare che all'interno del cumulo ci fosse una quantità di ossigeno e di aria abbondante, dato che, come si può osservare meglio in Figura 8 b) e come è già stato evidenziato, i rifiuti non venivano compattati. Per il primo dei due casi, vista la tipologia di rifiuti e visto il periodo (mese di agosto), è stata formulata dagli Enti responsabili l'ipotesi di autocombustione, mentre questo ragionamento non è stato applicato (almeno da quanto risulta dalle relazioni tecniche) al secondo caso, avvenuto a Ottobre dello stesso anno. Per quanto concerne le autorizzazioni, l'azienda rientrava in AIA, avendo quantitativi di rifiuti tali da richiedere questo tipo di permesso, mentre non sono state trovate informazioni sulla presenza di PEI e PEE redatti opportunamente, anche se questi documenti dovrebbero essere presenti, dal momento che gli incendi risalgono all'anno 2021, dopo l'entrata in vigore delle Linee guida operative per la gestione degli impianti di rifiuti.

Il terzo e ultimo caso, Incendio 3, ha coinvolto un impianto molto grande in provincia di Biella, compromettendo in totale circa 6500 m² di superficie. L'incendio è partito grazie a un innesco di natura dolosa, ha avuto una durata superiore alle 24 ore ed ha coinvolto cumuli di materiale plastico e cartaceo destinati a processi di riciclaggio. È sicuramente il caso più gravoso tra i tre, sia per l'area interessata, sia per la quantità di materiale bruciata; è l'unico caso esaminato dov'è stato utilizzato un campionatore ad alto volume Echo-Puf per rilevare la presenza di diossine e furani, per l'analisi del particolato e dei metalli presenti in atmosfera. Questo caso, oltre ai comuni inquinanti che riguardano anche il primo Stabilimento, presentava una criticità aggiuntiva dovuta alla presenza di amianto all'interno dello stabilimento, che quindi è stato coinvolto nell'incendio. La dispersione delle fibre di amianto ha meritato una relazione tecnica separata rispetto a quella che è stata formulata sugli "inquinanti classici"; tuttavia, la relazione sull'amianto non verrà presa in considerazione perché esula dagli scopi di questo lavoro.

3.4.1 Stabilimento 1

L'azienda situata in provincia di Alessandria (Dipartimento Sud Est) svolgeva diverse attività connesse ai rifiuti, tra le quali il recupero di materie plastiche e di ingombranti selezionati da convertire in CDR (Combustibile Derivato dai Rifiuti), o la gestione dell'isola ecologica con attività di stoccaggio provvisorio, cernita ed avviamento a recupero di carta, cartone, ferro, vetro, bottiglie di plastica, polietilene, e altri materiali. All'interno della ditta, durante il 2021, si sono verificati due episodi di incendio; il primo è avvenuto il 14 agosto 2021, in una Piazzola Ecologica e ha interessato rifiuti riconducibili ad ingombranti triturati quali ad esempio stoffe, materie plastiche varie, etc.; per i quali, in base alla composizione dei rifiuti e alla temperatura esterna molto calda, le autorità hanno ipotizzato un'autocombustione.



Figura 3. 8 Foto dell'impianto interessato dagli incendi uno e due. a) vista dall'alto dell'impianto dove si può osservare la Piazzola Ecologica sul fondo ; b) foto che ritrae la zona degli incendi, nota come Piazzola ecologica, che si estende dietro al macchinario utilizzato per ridurre i rifiuti ingombranti in trucioli.

Il secondo episodio è accaduto il 29 ottobre dello stesso anno, nella stessa area e ha interessato la stessa categoria di materiale. In questo secondo caso, nelle relazioni tecniche non vengono menzionate le possibili cause d'innescò dell'incendio e non viene menzionata l'ipotesi di autocombustione. In figura 3.7 sono riportate due foto che rappresentano l'aspetto della Ditta durante le attività; come si può osservare, la Ditta è formata da diversi edifici, da capannoni con struttura in pilastri e tamponature, nei quali vengono svolte diverse attività di trattamento rifiuti (come ad esempio trattamenti meccanici, smistamento, ...), e da una Piazzola Ecologia che invece, trovandosi all'aperto, è completamente esposta agli agenti atmosferici e nella quale si vedono (figura 3.8 b)) dei cumuli di rifiuti opportunamente ridotti di pezzatura, che sono proprio quelli interessati dai due incendi.

Incendio 1 - Sabato 14 Agosto 2021

Il principio di incendio è stato avvertito da un dipendente della Ditta, il quale ha immediatamente chiamato i Vigili del fuoco attorno alle ore 16:00. L'incendio, come anticipato, ha interessato rifiuti ingombranti triturati, e, grazie al pronto intervento delle squadre antincendio e degli addetti dello stabilimento, non sono state coinvolte altre aree dell'impianto. Per lo spegnimento delle fiamme sono stati adoperati gli idranti presenti sul perimetro dell'impianto, e i mezzi dei VVF. Il personale di Arpa ha iniziato a svolgere degli accertamenti ambientali all'incirca un'ora e mezza dopo l'inizio dell'incendio, a partire dalle aree in cui si riscontrava visivamente la presenza di fumi e gas inquinanti derivanti dalla combustione; contemporaneamente si sono effettuati dei prelievi istantanei di campioni di aria, sui quali sono state successivamente eseguite delle analisi di laboratorio, che hanno permesso di avere informazioni più dettagliate sulle sostanze tossico/nocive presenti e sulle loro relative concentrazioni. È stato effettuato un campionamento delle ceneri sulla piazzola interessata dall'incendio, per la misurazione di eventuali diossine.

Lunedì 16 agosto, due giorni dopo l'accaduto, Arpa ha poi effettuato un sopralluogo tecnico e ha constatato che:

- le acque impiegate per lo spegnimento dell'incendio, non trattenute dallo stesso, sono state convogliate nelle apposite vasche di raccolta, per essere smaltite correttamente in impianti appositi;

- il volume interessato dalla combustione era di circa 200 m³ e la società ha dichiarato di aver attivato le opportune procedure di valutazione legate ai residui di combustione, che devono poi essere smaltiti come rifiuto, anche in base alle prescrizioni dettate dai VVF nell'ambito dell'attività operativa di spegnimento dell'incendio;

Durante l'emergenza le condizioni anemologiche erano di vento proveniente da Nord-Nord Est; il pennacchio di fumi si alzava dal Piazzale Ecologico (luogo dell'incendio) diffondendosi sull'area circostante, con allungamento nella direzione del vento. Durante il primo intervento di Arpa (17:30 circa) il rogo era in fase di spegnimento, ma nella relazione non viene data una durata precisa dell'evento, né sono menzionati orari di fine intervento relativi allo spegnimento dell'incendio.

Il giorno dell'incendio sono stati effettuati dei campionamenti con una durata di circa 10-15 minuti, in 7 località differenti (evidenziate in figura 3.9) scelte in base alla direzione del vento, in corrispondenza dei punti risultati visibilmente a maggior ricaduta dei fumi e in prossimità di bersagli sensibili quali ad esempio scuole o luoghi pubblici abbastanza frequentati, in un arco di tempo che va dalle due alle circa sette ore successive all'inizio dell'incendio.



Figura 3. 9 Riferimento cartografico che evidenzia i 7 punti di campionamento scelti per il monitoraggio degli inquinanti, tra cui anche il luogo dell'incendio. (Arpa, s.d.)

I risultati dei campionamenti sono disponibili all'interno delle relazioni tecniche di Arpa trasmesse agli Enti; i composti rilevati sono Composti Organici Volatili (COV), HCl, NH₃ e CO, che sono prodotti tipici della combustione, e che i valori ottenuti vengono confrontati con

i limiti EPA AEGL 1 ed EPA AEGL 2¹² e, per i valori del monossido di carbonio CO, si effettua un confronto con i limiti di riferimento derivanti dalle analisi della qualità dell'aria. Dai valori risulta che il monossido di carbonio ha superato la concentrazione limite di riferimento; poiché ci si riferisce ai valori rilevati quotidianamente durante i controlli della qualità dell'aria, è assolutamente prevedibile che i valori rilevati in seguito a una situazione incidentale siano superiori alle soglie di riferimento; in aggiunta, le concentrazioni di tutte le sostanze diminuiscono all'allontanarsi dal luogo dell'incendio, perché la nube e i suoi composti vengono diluiti e si disperdono in atmosfera.

Contestualmente ai campionamenti istantanei, vengono effettuati dei prelievi della matrice aria ambiente; i campioni vengono inviati in laboratorio dov'è possibile fare un'analisi qualitativa e quantitativa ad ampio spettro di più di 60 sostanze organiche, seguendo la metodica EPA TO-15¹³. Per questo tipo di campionamenti si utilizzano i canister. I canister sono stati posizionati in prossimità dell'incendio (canister n°13¹⁴) e in un'area esterna alla ditta (canister n°12); il 13 ha evidenziato la presenza di idrocarburi dovuti alla combustione di materiale legnoso (ad esempio il propilene), di altri composti di natura organica e acroleina, mentre tali sostanze risultano inferiori al limite di rilevabilità nel campione prelevato in prossimità dell'area esterna alla ditta, dal canister n° 12.

Durante il sopralluogo tecnico del 16 agosto si sono invece effettuati dei campionamenti delle ceneri per rilevare l'eventuale presenza di PCDD/PCDF. Le analisi eseguite sul campione di ceneri risultano comunque inferiori ai valori di riferimento, che sono di duplice origine:

- Regolamento Parlamento Europeo e Consiglio UE 850/2004/CE – Inquinanti organici persistenti_ Allegato IV (Regolamento Europeo 850/2004/CE);
- D. Lgs. 3 settembre 2020, n.121; in attuazione delle direttive 2018/850/UE (“Pacchetto Economia Circolare”) – *Norme in materia di discariche di rifiuti* – Modifiche al D. Lgs. 36/2003_ Articolo 6.

In conclusione, all'interno della relazione, viene riportato che: “ *Le analisi chimiche di Laboratorio, sui campioni di aria prelevati in prossimità del cumulo incendiato, evidenziano la presenza di concentrazioni di inquinanti organici riconducibili alla combustione di biomassa (propilene), in modo particolare idrocarburi aromatici (stirene, benzene, toluene). – Le concentrazioni rilevate, nei punto oggetto di accertamenti tecnico-analitici e ritenute più sensibili per la popolazione residente, sono tali da escludere possibili effetti negativi sulla salute*”.

¹² L'EPA è l'Environmental Protection Agency, un'agenzia del governo federale degli Stati Uniti preposta alla protezione della salute umana e dell'ambiente (Anon., s.d.)

AEGL è l'acronimo di Acute Exposure Guidelines Levels; si tratta di valori definiti dalle linee guida dell'US EPA che fissano i limiti di esposizione per l'intera popolazione e fanno riferimento a periodi di esposizione che vanno dai 10 minuti alle 8 ore; ordinati da AEGL 1 a AEGL 3 in ordine di gravità delle conseguenze crescente. (ISSN, 2022)

¹³ EPA Method TO-15 è una procedura usata per analizzare campioni di aria raccolti utilizzando dei canister

¹⁴ I canister sono numerati dall'Agenzia e si è scelto di mantenere la dicitura originale

Incendio 2 – Venerdì 29 Ottobre 2021

Il secondo episodio si è verificato nello stesso piazzale, coinvolgendo la stessa tipologia di rifiuti, attorno alle ore 21:00 del 29 Ottobre, circa due mesi dopo il primo incendio. Le modalità di intervento sono state le medesime del primo caso, per lo spegnimento dell'incendio sono stati utilizzati gli idranti e le autobotti dei Vigili del fuoco. In figura 3.10 sono rappresentate le immagini dell'incendio durante le operazioni di spegnimento. Dalle immagini si vede un pennacchio di fumo che si innalza dal Piazzale Ecologico dell'azienda e si estende nella direzione del vento, che proveniva da Sud- Sud Ovest.

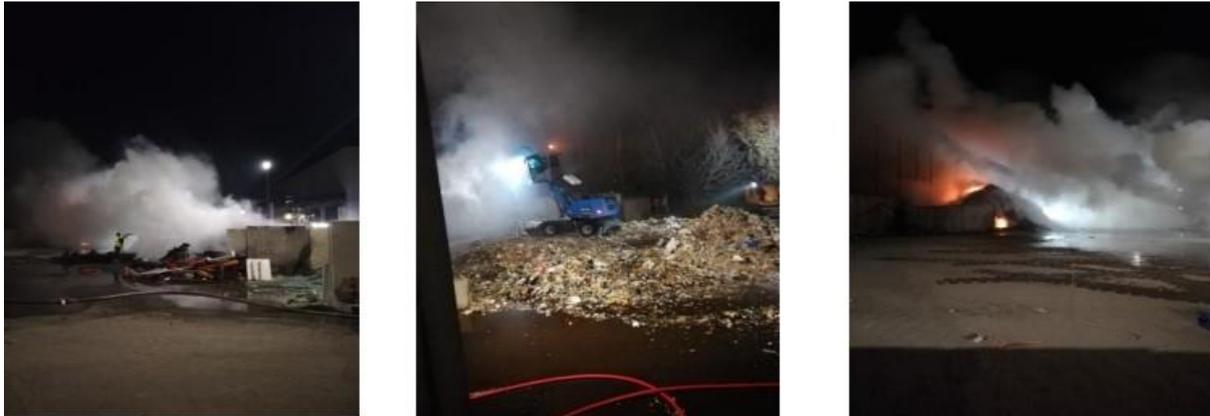


Figura 3. 10 Foto prese dalla relazione tecnica Arpa in merito all'incendio di rifiuti avvenuto nella Ditta in questione in provincia di Alessandria.

Anche in questo caso sono stati effettuati sia campionamenti con misura diretta in due diverse località, qualche ora dopo il presunto inizio della combustione (attorno alle 21:00), con un tempo di campionamento di 10-15 minuti, sia dei prelievi di aria mediante dei canister (n°5 e n°6), che sono stati oggetto di analisi quantitative e qualitative in laboratorio. In figura 3.11 si riporta il riferimento cartografico.



Figura 3. 11 Riferimento cartografico utile per i campionamenti effettuati in seguito all'incendio del 28 Ottobre presso la Ditta nel punto A della cartina geografica. (Arpa, s.d.)

Le misurazioni dirette sono state fatte sia in prossimità dell'incendio (punto A), dove era presente un intenso odore di combustione, sia in una seconda località sottovento (punto B), dove si avvertiva un lieve odore di combustione; sia nel punto A che nel punto B si sono eseguite due misurazioni, nel punto A alle 22:50 e alle 23:40, mentre in B alle 24:00 e alle 24:30. Sono stati rilevati, come nel caso precedente COV, cloruro di idrogeno (HCl), fluoruro di idrogeno (HF), monossido di carbonio (CO) e ammoniaca (NH₃).

I canister erano stati posizionati negli stessi punti di campionamento, nel punto A (in prossimità dell'incendio) era collocato in canister n°5 e nel punto B il canister n°6. Entrambi i campioni contenevano molti composti, tra cui:

- propilene;
- cloruro di metile;
- acroleina;
- acetone;
- triclorofluorometano (Freon 11);
- tetracloroetilene;
- isopropanolo;
- 2-butanone;

- acetato di etile;
- benzene;
- toluene;
- etilbenzene;
- stirene;
- eptano;
- 1,2,4-trimetilbenzene;
- naftalene.

Il campione contenuto nel canister n°5, situato in prossimità dell'incendio ha mostrato valori rilevabili dei composti sopracitati, mentre il campione contenuto nel canister n°6, posizionato in prossimità dell'area esterna, presenta concentrazioni inferiori di tali sostanze, molte delle quali erano al di sotto dei limiti di rilevabilità.

In conclusione, la relazione tecnica dichiara che: *“Le analisi chimiche di Laboratorio, sui campioni di aria prelevati in prossimità del cumulo incendiato, evidenziano la presenza di concentrazioni di inquinanti organici riconducibili alla combustione della biomassa (propilene), in modo particolare idrocarburi aromatici (stirene, benzene, toluene). Comunque, le concentrazioni rilevate, nei punti oggetto di accertamenti tecnico-analitici e ritenute più sensibili per la popolazione residente, sono tali da escludere possibili effetti negativi sulla salute”*.

3.4.2 Stabilimento 2

Incendio 3 – Lunedì 12 agosto 2019

L'azienda svolge attività di recupero e trattamento di rifiuti non pericolosi, è situata in provincia di Biella. Si tratta di un incendio doloso partito il 12 agosto 2019 da un'azienda confinante, che ha portato all'incenerimento di tonnellate di rifiuti in carta e plastica destinati al riciclaggio, devastando in totale circa 6500 m² di superficie. Alle ore 06:00 del 12 agosto l'incendio è stato segnalato ai Vigili del fuoco, i quali hanno avvisato il Dipartimento Nord Est di Arpa, che, vista la portata dell'evento incidentale, ha chiamato a supporto anche i tecnici del Dipartimento Nord Ovest (Provincia di Torino) per effettuare tutti i campionamenti necessari.

Come si può osservare dalle immagini riportate in figura 3.12, l'incendio ha coinvolto cumuli di materiale plastico e cartaceo stoccati all'aperto, sollevando una coltre di fumo nero molto denso, che si sviluppava prevalentemente in direzione Ovest e Nord Ovest, sotto la spinta del vento. Data l'entità dell'incendio, durante la giornata del 12 agosto sono stati fatti diversi tipi di campionamenti:

- misurazioni istantanee, utilizzando:
 - analizzatore TIGER per il parametro COV;
 - fiale DRAGHER per i parametri di HCl, CO e NH₃;
 - analizzatore AEROQUAL SERIES 500 per rilevare CO e CH₂O (formaldeide);
- campionamenti di aria con Canister da sottoporre ad analisi di laboratorio più approfondite e ad ampio spettro, per la caratterizzazione di idrocarburi alifatici e aromatici, composti clorurati e ossigenati;

- raccolta di un campione di aria utilizzando un campionatore ad alto volume Echo-Puf all'interno del sito interessato per la rilevazione di eventuali diossine.



Figura 3. 12 L'immagine a sinistra rappresenta la vista dell'incendio dall'esterno dello stabilimento, mentre a destra viene mostrata la situazione dall'interno. Le immagini risalgono al giorno Lunedì 12 agosto 2019. (Arpa, s.d.)

Il giorno successivo, martedì 13 agosto 2019, i tecnici del Dipartimento Nord Est si sono recati sul luogo dell'incendio, che era in fase di spegnimento, per effettuare un'altra serie di misurazioni istantanee che hanno rilevato valori tra i 0.5 e 1.7 ppm di formaldeide¹⁵ nei pressi dei cumuli in via di spegnimento; mentre nei territori circostanti gli inquinanti monitorati sono risultati in concentrazioni inferiori ai limiti di rilevabilità e perciò prossimi allo zero. Di seguito, in figura 3.13, viene riportato il riferimento geografico del luogo dell'incendio, dove si possono distinguere chiaramente il sito dell'incendio (evidenziato con contorno rosso scuro), il posizionamento dell'Echo-Puf per l'analisi delle diossine e punti di campionamento delle misure istantanee (pallini blu) e di quelle effettuate mediante Canister (pallini verdi), i cui campioni vengono analizzati in laboratorio.

¹⁵ Composto organico volatile pericoloso per la salute (Ministero della salute Direzione generale della prevenzione sanitaria Direzione generale della comunicazione e dei rapporti europei e internazionali, 2015)

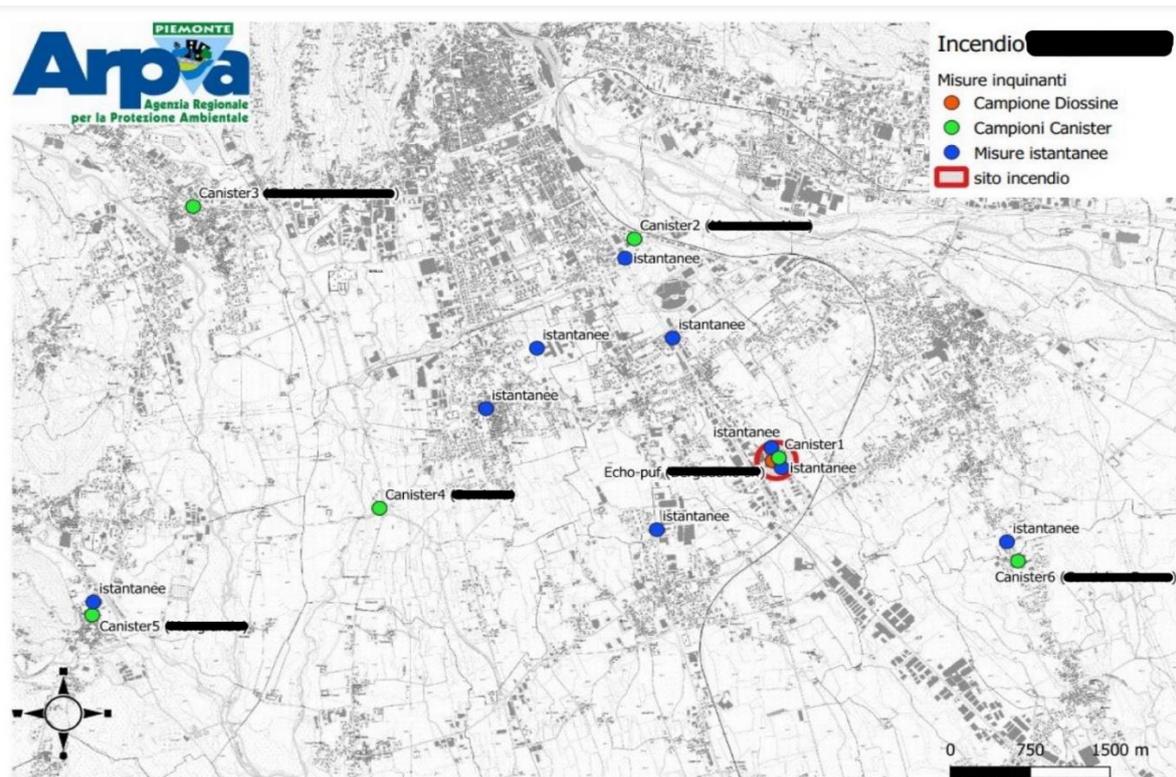


Figura 3. 13 Cartina geografica in cui si vedono chiaramente i punti di campionamento scelti, suddivisi per tipologia e riconoscibili grazie ai diversi colori utilizzati per i marker. Il sito dell'incendio è invece circondato da una linea spessa di colore rosso scuro, come riportato nella leggenda. I nomi dei siti sono stati censurati per questioni di privacy, e la loro conoscenza non è rilevante ai fini di questo elaborato (Arpa, s.d.)

I campionatori canister sono stati attivati a circa 6 ore dall'inizio dell'incendio, che continuava a divampare nonostante i tentativi di spegnimento, e da questa analisi sono stati rilevati molteplici composti associati alla combustione di plastiche e carta, tra cui propilene, clorometano, alcol etilico, acetone, composti ciclici aromatici e altri. In prossimità dell'incendio, in presenza del canister n° 1, sono stati rilevati valori elevati di propilene, acroleina (sintomo di una combustione incontrollata di materiale organico), benzene, toluene e stirene; gli stessi composti sono stati rilevati in tracce dal canister n° 2 e risulano in quantitativi non significativi negli altri punti di campionamento.

Il campionamento con Echo-Puf per la determinazione di PCDD/PCDF e PCB è iniziato alle ore 11:00 del 12 agosto e si è concluso 22 ore dopo, alle 09:00 del 13 agosto, con un flusso di aspirazione di 100 l/min, raccogliendo quindi in totale 132 m³ di aria contaminata. Nella relazione tecnica complessiva sui prelievi con Canister e campionatore ad alto volume Echo-Puf, in merito alle metodologie utilizzate, viene riportato che: *“Il campionamento dell'aria per la ricerca dei microinquinanti organici secondo il metodo EPA TO-9A è una tecnica che permette di valutare la quantità di microinquinanti in sospensione, presenti sia in fase solida che gassosa. La ricerca di PCDD/DF e PCB è stata eseguita con analisi strumentale in HRGC/HRMS¹⁶ rispettivamente secondo i metodi EPA 1613B:1994 (U.RP.M970) e EPA*

¹⁶ HRGC è un gascromatografo ad alta risoluzione; HRMS è uno spettrometro di massa magnetico ad alta risoluzione. Entrambi usati per l'analisi di tracce di composti organici

1668C:2010 (U.RP.M971), prove accreditate dall'Ente ACCREDIA¹⁷, in conformità con quanto prescritto dalla norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025. I microinquinanti organici, PCDD/PCDF e PCB, non vengono rilevati come singoli composti, ma come miscele complesse dei diversi congeneri aventi differente tossicità. Per esprimere la concentrazione complessiva di PCDD/PCDF e PCB si utilizza la tossicità equivalente (TEQ), ottenuta sommando i prodotti tra la concentrazione dei singoli congeneri e il loro relativo Fattore di Tossicità Equivalente (i TEF sono stati determinati per ogni congenere confrontando la tossicità del singolo composto organoclorurato con quella della 2,3,7,8-TCDD il cui fattore di tossicità è pari a 1)”. Grazie alle condizioni meteorologiche, la spinta del vento ha contribuito alla diluizione delle concentrazioni medie al suolo delle sostanze inquinanti derivate dalla combustione, e in generale i valori registrati non sono tali da essere assimilati a soglie di attenzione o di allarme. Viene tuttavia segnalato che è stata riscontrata la presenza di materiale incenerito, e quindi contaminato dagli inquinanti, su alcune zone limitrofe, nei pressi del perimetro dello stabilimento, confinante con alcuni terreni adibiti a coltivazione; mentre per quanto riguarda il sito dell'incendio, il materiale era situato su una platea impermeabile, che si ipotizza abbia contenuto i danni, impedendo che il terreno venisse impregnato con i contaminanti. Questo è quanto dichiarato dalle relazioni tecniche sui diversi campionamenti effettuati, che sono datate al 22 agosto 2019, 10 giorni dopo l'inizio dell'incendio.

3.5 Considerazioni ulteriori

Dall'analisi delle relazioni tecniche sono scaturiti diversi spunti di riflessione su alcuni aspetti riguardanti gli incendi negli impianti di rifiuti, che hanno permesso di dare una prima impostazione oggettiva al lavoro:

- I rifiuti coinvolti negli incendi sono prevalentemente in materiale cartaceo, plastico e ligneo; probabilmente una certa percentuale era costituita da tessuti in fibre sia naturali che plastiche che costituiscono gli ingombrati (quali materassi, poltrone, arredamento in generale o ingombranti di altro tipo). L'individuazione dei materiali coinvolti ha permesso di fare una scelta nella tipologia dei solidi considerati nelle simulazioni che vengono presentate nell'ultimo capitolo; infatti in seguito si farà riferimento ad alcune tipologie di plastiche (quali ad esempio PP, PE, PET o PVC) molto comuni e utilizzate, e al legno, che in generale è spesso presente nei rifiuti ingombranti. La scelta delle classi di materiali utilizzati nelle simulazioni deriva quindi dall'analisi dei rifiuti bruciati nei diversi casi di incendio analizzati, tra cui anche i tre che sono stati riportati all'interno dell'elaborato; sempre tenendo in considerazione la disponibilità dei dati ricercati in letteratura e relativi a tali classi di materiali. In Arpa è stato possibile accedere a un documento di lavoro molto interessante nel quale le sostanze prodotte durante la combustione sono correlate in maniera approssimativa ai materiali combustibili; questa consultazione ha rafforzato le ipotesi sulle classi di materiale scelte, ovvero plastiche di diverso genere, legno e carta.
- L'incendio verificatosi nello Stabilimento 2 ha coinvolto anche parte dell'edificio mentre invece gli incendi verificatisi nello Stabilimento 1 hanno coinvolto

¹⁷ Accredia è l'Ente Unico nazionale di accreditamento designato dal governo italiano, in applicazione del Regolamento europeo 765/2008, ad attestare la competenza, l'indipendenza e l'imparzialità degli organismi di certificazione, ispezione e verifica, e dei laboratori di prova e taratura. Accredia è un'associazione riconosciuta che opera senza scopo di lucro, sotto la vigilanza del Ministero dello Sviluppo Economico. [(Accredia, s.d.)

esclusivamente un'area esterna. Si tratta di due scenari differenti e nasce quindi l'esigenza di affrontarli diversamente facendo una distinzione tra incendi all'aperto e incendi al chiuso, che verrà esaminata nel capitolo successivo. A valle di alcune considerazioni, si è scelto di concentrare gli sforzi sui casi di incendi all'aperto, trascurando quindi i fenomeni all'interno di edifici, argomento che rimane quindi aperto a studi successivi.

- Gli eventi relativi allo Stabilimento 1 hanno coinvolto materiale triturato mentre l'evento nello Stabilimento 2 riguardava rifiuti accatastati destinati al riciclaggio. La differenza della forma fisica nei due casi ha probabilmente influenzato la dinamica degli incendi e in particolare la curva di crescita dell'incendio e la sua durata. Quest'aspetto, per quanto interessante, non è stato approfondito successivamente ma è stato spunto di diverse riflessioni e mette in luce una tra le svariate differenze tra la combustione di un materiale solido a quella di un combustibile liquido, anticipando delle considerazioni che verranno esplicitate al successivo capitolo.
- All'interno delle relazioni si parla anche degli interventi svolti dai Vigili del fuoco o dal personale addetto interno alla ditta che hanno lo scopo di spegnere l'incendio e contenere i danni. Questo genere di interventi interferisce, ovviamente, col fenomeno influenzando l'evoluzione dell'incendio. Esistono diverse strategie di intervento e a seconda della scelta cambia l'influenza che queste hanno sulla dinamica di combustione e quindi sulla durata dell'incendio e sulla qualità composti prodotti; si tratta di procedure decise sul momento, difficili da prevedere e, pertanto, la loro modellazione è molto complessa.

Da queste prime considerazioni nascono una serie di ragionamenti successivi, che verranno approfonditi nel successivo capitolo.

4. Fenomenologia degli incendi e presentazione dei programmi utilizzati

I casi di incendi descritti nel capitolo precedente sono solo alcuni tra quelli analizzati durante l'esperienza di tirocinio; l'assimilazione di tali informazioni è stata fondamentale per ispirare il processo descrittivo della fenomenologia di un incendio di rifiuti (di seguito incendio di cumulo). Innanzitutto, è stato utile suddividere il fenomeno in fasi successive (seguendo quindi un ordine cronologico) per poi capire quali possono essere le evoluzioni in base alle diverse circostanze in cui questo si sviluppa e cosa cambia da una situazione all'altra; ad esempio, prima si sono considerate le fasi di una combustione non influenzata da interventi esterni e poi si è approfondita la diramazione che si crea nel caso in cui si hanno operazioni di spegnimento. L'obiettivo è ottenere un modello per la descrizione del termine sorgente di un incendio di cumulo dove i rifiuti sono il combustibile; dal momento che in Arpa si ha a disposizione Phast, si è posto il problema di capire se questo potesse essere utilizzato per la modellazione del termine sorgente e, in caso contrario, veniva invece richiesto di sviluppare un modello ad hoc reperendo, quando possibile, le informazioni necessarie in letteratura. L'output del modello può essere più o meno ampio ma la condizione fondamentale è che fornisca i parametri necessari alla modellazione successiva della dispersione dei fumi in ambiente, e quindi temperatura, altezza delle fiamme, la potenza emessa durante, portata e composizione dei fumi.

Il capitolo in esame si apre quindi con una descrizione fenomenologica dell'incendio di cumulo a valle della quale vengono esplicitate le assunzioni fatte al fine di giungere alla modellazione matematica dell'evento. In seguito, vengono approfondite la combustione di sostanze solide e la combustione di sostanze liquide, da cui emerge che la combustione dei solidi può essere influenzata da un numero maggiore di variabili (ad esempio, la forma fisica del combustibile) e in aggiunta si ha una differenza di fondo dovuta al fatto che le proprietà di un solido eterogeneo sono variabili e difficilmente valutabili, mentre per una sostanza liquida il discorso è molto più semplice, avendo questa proprietà definite. L'interesse verso i combustibili liquidi nasce dall'opportunità di utilizzare Phast come strumento di modellazione degli incendi di rifiuti, essendo questa una strada che ha suscitato parecchio interesse nell'Ente presso cui è stato svolto il lavoro di tesi; il capitolo prosegue infatti assumendo un taglio più modellistico, grazie al quale viene introdotto il software Phast.

Com'è stato anticipato nell'Introduzione, Phast è un software per le analisi delle conseguenze nell'ambito della sicurezza di processo, il quale permette di simulare degli scenari che coinvolgono sostanze tossiche o infiammabili all'interno di industrie pericolose come quelle dei comparti oil & gas, chimico e petrolchimico o di transizione energetica, ma anche di gasdotti, installazioni offshore e processi di trasporto e stoccaggio. Dopo aver approfondito le funzionalità del software e studiato i diversi scenari disponibili al suo interno, si è scelto di assimilare l'incendio di cumulo a un pool fire e sono stati quindi introdotti i dati richiesti per portare avanti tale simulazione. Parallelamente a questa analisi, durante l'esperienza di tirocinio è stato svolto un lavoro di ricerca al fine di verificare se in commercio fossero disponibili dei modelli adatti alla descrizione di un incendio di rifiuti o se ci fossero dei progetti in atto volti allo sviluppo di un prodotto utile per tale modellazione. La ricerca non ha prodotto riscontri; Phast non si è rivelato lo strumento adatto a tale scopo e in letteratura non sono presenti degli strumenti completi che possano essere utilizzati tal quali per la simulazione di un incendio di rifiuti. Probabilmente la ragione è da ricercarsi sia nella complessità dell'argomento trattato, che quindi ha bisogno di essere studiato a fondo, sia nel fatto che si tratta di un problema emerso

relativamente di recente e quindi non si era manifestato il bisogno, prima di questo momento, di avere un modello per la sua descrizione.

In letteratura sono stati trovati alcuni elementi e correlazioni che hanno permesso di sviluppare un prototipo di modello di termine sorgente per gli incendi di cumulo ex novo, implementato su Excel. Si tratta di un modello approssimativo che descrive la fase stazionaria di un incendio di cumulo che coinvolge solamente un materiale per volta; è stato testato con alcune tipologie di materiali scelti sulla base delle informazioni derivanti dalle relazioni tecniche. I dati disponibili sono tabulati e derivano quindi da set sperimentali; le dimensioni di un incendio di cumulo possono raggiungere diverse migliaia di metri quadrati e non sono state trovate in letteratura delle simulazioni di incendi di tali dimensioni perché i set sperimentali hanno dimensioni contenute e raramente vanno oltre qualche metro, sia per questioni economiche sia per la difficoltà nel gestire degli incendi tanto vasti. L'incertezza principale del modello è quindi correlata a una mancanza di dati di riscontro, che possano confermare o smentire i risultati ottenuti; le correlazioni trovate in letteratura, infatti, riguardano incendi con un raggio equivalente massimo di alcune decine di metri, mentre non si sono trovati approfondimenti per dimensioni superiori e non è detto che il fenomeno sia lineare all'aumentare della scala. Il modello e i suoi parametri vengono presentati nella seconda parte del capitolo; le principali difficoltà hanno riguardato la ricerca di una correlazione adatta al calcolo dell'altezza delle fiamme, per il quale vengono esposti diversi approcci con campi di validità differenti e quindi il metodo cambia al variare delle dimensioni dell'incendio considerato, il trovare una procedura per il calcolo della temperatura nel punto di altezza massima raggiunta dalle fiamme e la stima della composizione dei fumi, che tuttavia non è stata considerata in questo elaborato. I risultati delle simulazioni e le considerazioni a riguardo vengono invece presentate nel capitolo successivo.

4.1 Fenomenologia dell'incendio

Gli impianti di gestione rifiuti possono avere delle aree di stoccaggio all'aperto o al chiuso, all'interno di edifici, magari in prossimità del macchinario nel quale avviene il trattamento. Spesso questi sono sistemati in cumuli disomogenei che possono raggiungere l'altezza di diversi metri oppure, nel caso di rifiuti imballati, possono trovarsi sistemati secondo geometrie più o meno ordinate e impilati in cataste. I cumuli possono essere formati da diverse tipologie di materiali e sono generalmente suddivisi per categoria di rifiuto (ad esempio plastica, cartone, ...), specialmente se devono essere conferiti o se già si trovano in un impianto di riciclaggio, dove è richiesta la separazione dei materiali. La disposizione deve essere organizzata in modo tale da poter contenere ed impedire la propagazione di eventuali incendi che possono svilupparsi; soprattutto all'aperto e nei periodi estivi, infatti, si raggiungono temperature molto elevate e, come è noto, basta un piccolo innesco per far partire la combustione e causare dei danni.

Così come per le sostanze o le miscele, anche i rifiuti possono avere diversi comportamenti al fuoco e in base a tale reazione, possono essere definiti comburenti, infiammabili o facilmente infiammabili. All'interno dell'allegato I della parte IV de TUA (Decreto legislativo n.152, 2006) sono riportate le caratteristiche di pericolo per i rifiuti, che si distinguono in: “[...]

H2 «Comburente»: sostanze e preparati che, a contatto con altre sostanze, soprattutto se infiammabili, presentano una forte reazione esotermica;

H3-A «Facilmente infiammabile»: sostanze e preparati:

- liquidi il cui punto di infiammabilità è inferiore a 21°C (compresi i liquidi estremamente infiammabili), o
- che a contatto con l'aria, a temperatura ambiente e senza apporto di energia, possono riscaldarsi e infiammarsi, o
- solidi che possono facilmente infiammarsi per la rapida azione di una sorgente di accensione e che continuano a bruciare o a consumarsi anche dopo l'allontanamento della sorgente di accensione, o
- gassosi che si infiammano a contatto con l'aria a pressione normale, o
- che, a contatto con l'acqua o l'aria umida, sprigionano gas facilmente infiammabili in quantità pericolose;

H3-B «Infiammabile»: sostanze e preparati liquidi il cui punto di infiammabilità è pari o superiore a 21°C e inferiore o pari a 55°C ; [...]”

Se si ha a che fare con un rifiuto composto da materiali a rischio incendio, quando questo viene esposto a una sorgente di innesco è molto facile che prenda fuoco; dopo la fase di ignizione inizia quindi la fase di propagazione, durante la quale la reazione di combustione si propaga a partire dalla zona di innesco e investendo via via il materiale combustibile circostante. In figura 4.1 si riporta un esempio di curva HRR (Heat Release Rate), che rappresenta il tasso di rilascio termico per unità di tempo durante un incendio, cioè la variazione della potenza termica rilasciata.

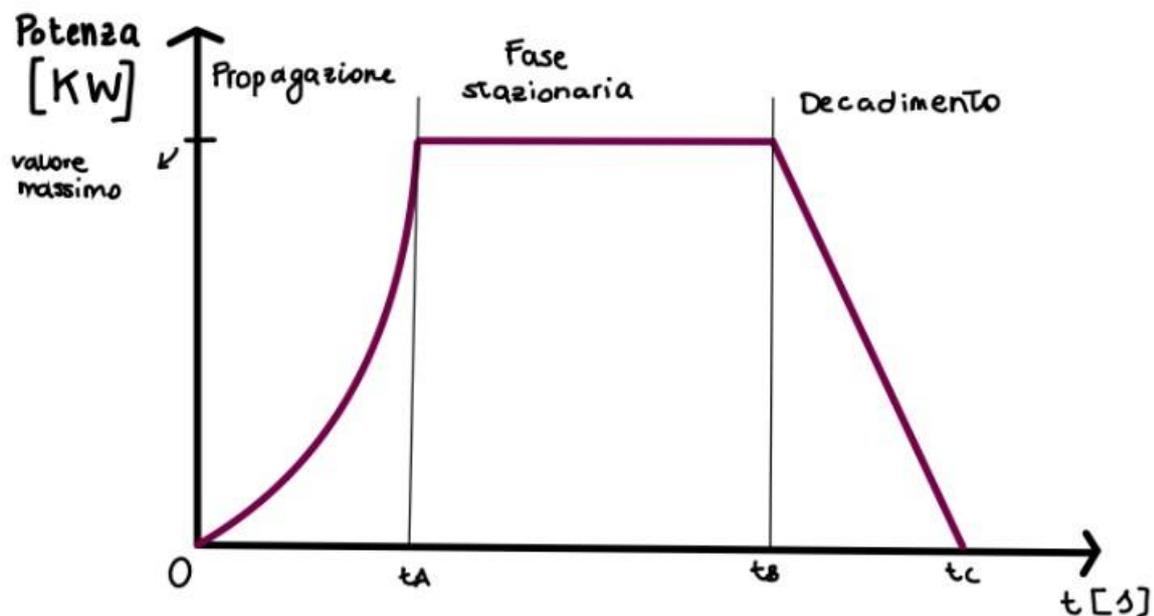


Figura 4.1 Curva Tempo-Potenza di un incendio generico.

Come si osserva in figura, la potenza emessa cresce nella prima fase (propagazione), per poi restare costante durante la fase stazionaria e assumere infine un andamento decrescente nella fase finale di esaurimento.

La durata della fase iniziale di ignizione dipende, oltre che da caratteristiche strettamente legate al combustibile (come, ad esempio, la facilità con cui prende fuoco o le caratteristiche superficiali), anche dalla geometria del cumulo e dalla ventilazione dell'ambiente, quindi per esempio in un piazzale all'aria aperta con una leggera brezza, la combustione sarà sicuramente facilitata rispetto a un ambiente chiuso dove l'apporto di ossigeno è limitato.

La fase di propagazione dell'incendio è quella che inizia a dare le prime avvisaglie del fatto che sta succedendo qualcosa; vengono prodotti fumi di combustione che limitano la visibilità e che trasportano gas tossici e nocivi, si verifica un rapido aumento delle temperature e dell'energia irraggiata nelle zone circostanti e in genere si ha la prima allerta ai soccorsi. Nel frattempo, il fuoco continua a propagarsi rapidamente e fino a raggiungere la fase di incendio generalizzato, durante la quale la velocità di combustione cresce fino ad assumere un valore stazionario le temperature possono superare il migliaio di gradi centigradi e diventa difficile avvicinarsi all'area circostante perché il flusso di calore è molto intenso ed è pericoloso per la salute umana.

L'incendio comporta la presenza di nubi di fumi, caratterizzate da un odore di combustione che varia a seconda del materiale coinvolto e che viene trasportato dal vento e si spande nelle zone circostanti, richiamando l'attenzione del personale dell'impianto, della popolazione esterna o di Enti pubblici di soccorso (es. 118, V.V.F), che, rendendosi conto del pericolo, effettuano una segnalazione dell'incendio a cui segue la mobilitazione delle autorità di competenza. Gli interventi sul campo sono svolti nella prima fase di avvistamento dal personale dello stabilimento, che dovrebbe essere addestrato adeguatamente per fronteggiare emergenze simili, in modo da riuscire a tenere sotto controllo la situazione almeno fino all'arrivo dei Vigili del fuoco. Nella realtà, non sempre si riesce a fermare l'incendio in una fase incipiente e quindi spesso è l'intervento dei Vigili del Fuoco ad essere risolutivo.

Durante le situazioni emergenziali quali un incendio di cumulo si dovrebbe seguire la procedura indicata all'interno di PEI e PEE al fine di circoscrivere l'evento e limitare i danni. Infatti, richiamando quanto detto all'interno del Capitolo 2, tutti gli impianti che trattano rifiuti devono avere i Piani di Emergenza aggiornati secondo quanto previsto dalla Legge 132/2018, ancorché le prefetture non si siano ancora totalmente attrezzate per garantirne la predisposizione.

Le operazioni di spegnimento influenzano la dinamica dell'incendio; la strategia adottata può essere di tipo diretto o indiretto. L'attacco diretto prevede lo spegnimento delle fiamme intervenendo direttamente sul fuoco mentre l'intervento indiretto consiste nell'isolare il combustibile che sta bruciando, lasciando quindi che l'incendio si esaurisca in autonomia. La strategia di intervento dipende da caso a caso e viene decisa sul momento dai Vigili del Fuoco, non è prevedibile e non verrà considerata nel seguente lavoro. Nonostante ciò, è importante osservare che nel caso di intervento diretto, se ad esempio viene utilizzata acqua o delle schiume, la temperatura della superficie del cumulo colpito subisce un decremento più o meno marcato, e questo influenza la qualità della combustione, che comunque prosegue e non si arresta all'istante, e la composizione dei fumi di combustione, che potrebbe cambiare notevolmente.

L'abbassamento delle temperature legato alle operazioni di intervento comporta la produzione di composti parzialmente ossidati e più pericolosi; ad esempio, tra questi rientrano le aldeidi, le diossine e, in generale, composti caratterizzati da un basso stato di ossidazione (Arpa, s.d.).

In figura 4.2 si riporta a titolo esemplificativo un esempio di curva Tempo vs Temperatura di un incendio reale, dalla quale si può osservare che la temperatura cresce in una prima fase dell'incendio, raggiunge un picco di massimo e poi diminuisce lentamente fino a raggiungere la temperatura ambiente, una volta che l'incendio si è esaurito.

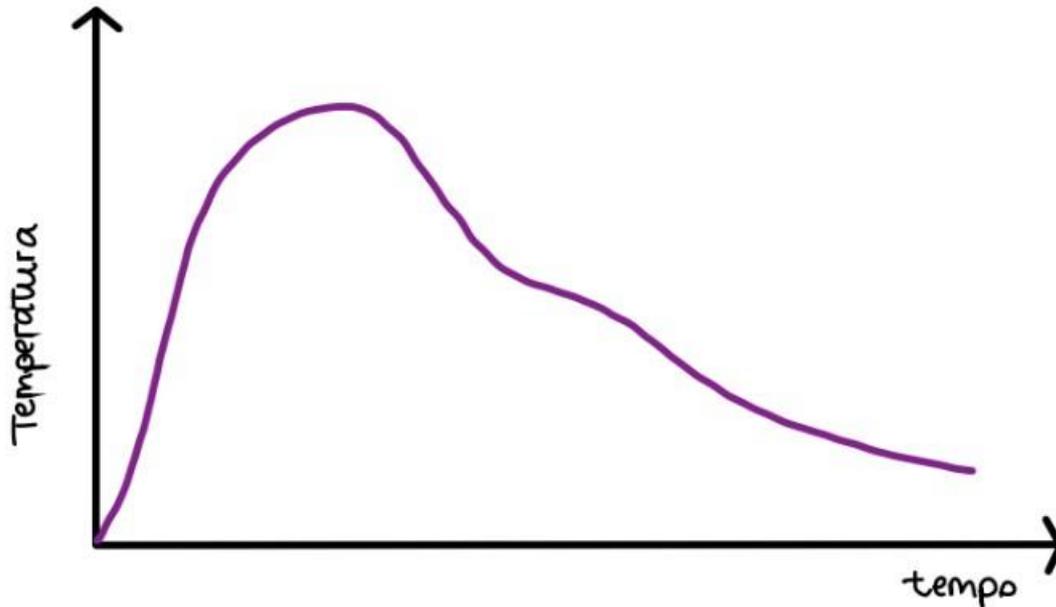


Figura 4. 2 Curva tempo - temperatura incendio generico.

A questo proposito, l’Agenzia si è occupata di svolgere un lavoro molto importante al fine di prevedere quali possano essere i prodotti di combustione dispersi in atmosfera in seguito a un incendio e individuare quelli maggiormente tossici e pericolosi. A seconda dei materiali incendiati e delle condizioni di combustione si sviluppa una vasta gamma di prodotti di pirolisi, ad esempio monossido di carbonio, acido cianidrico e anidride carbonica che, combinati con la scarsa presenza di ossigeno consumato dalla reazione di combustione, costituiscono un pericolo per gli individui adiacenti alla zona dell’incendio. Nella zona più esterna e quindi meno prossima all’incendio, il rischio maggiore è costituito dai gas irritanti inorganici (acidi, cloro molecolare, ammoniaca o fosgene) e organici (aldeidi, particolato, PCDD/F e altri).

A titolo di esempio, in figura 4.3 si riporta un grafico rappresentante il profilo delle concentrazioni di CO in funzione della distanza sottovento espressa in km, ottenuto per un incendio di un serbatoio di petrolio (Argyropoulos, C. D., et al., 2010).

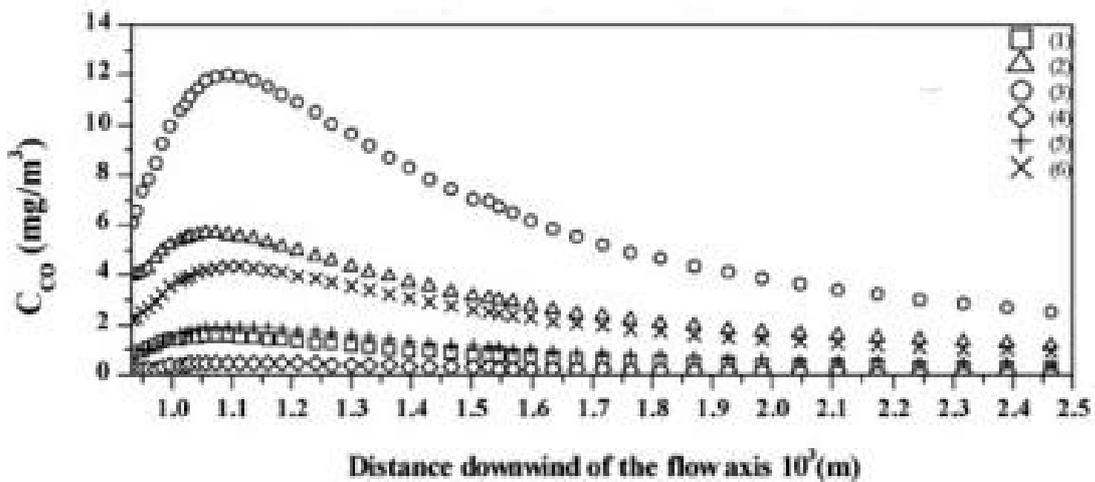


Figura 4. 3 Profilo di concentrazione di CO in funzione della distanza sottovento espressa in km per l'incendio di un serbatoio di petrolio per sei scenari differenti (Argyropoulos, C. D., et al., 2010).

Come si può osservare dal grafico, si ha un picco di concentrazione a circa 1 km di distanza dalla sorgente di emissione e all'allontanarsi dal punto di picco la concentrazione scende al crescere del raggio dell'area considerata. Questo grafico riguarda uno scenario di incendio all'aperto, però, com'era stato introdotto precedentemente, non sempre gli incendi di rifiuti avvengono all'aperto, ma può capitare di trovarsi davanti uno scenario al chiuso, all'interno di un edificio.

Immaginando lo scenario di un incendio all'interno di un edificio, la dinamica dell'evento è diversa ed influenzata da fattori differenti. Gli edifici sono progettati affinché entrino in funzione i dispositivi di protezione e prevenzione (come i rilevatori di fumo, allarmi automatici) e la compartimentazione dell'edificio dovrebbe bloccare la diffusione dell'incendio. Un altro aspetto che può evolvere diversamente è il rilascio in atmosfera dei fumi prodotti dalla combustione, che non avviene con un trasporto immediato causato dal vento, ma si ha una situazione in cui i fumi sono dapprima confinati all'interno dell'edificio, rimangono lì per un certo tempo e il trasporto dall'interno verso l'atmosfera viene invece regolato dal sistema di ventilazione dell'edificio, che può essere naturale (ad esempio finestre, porte o altri tipi di aperture) o forzato (ad esempio in presenza di ventole). La risalita dei fumi in atmosfera è influenzata da questa differenza, perché al tempo trascorso dalla produzione dei fumi al momento in cui raggiungono l'esterno è associata una perdita di energia termica, e quindi i fumi si trovano a una temperatura inferiore rispetto a quella che avrebbero se fossero stati prodotti direttamente all'aria aperta.

Descrivendo la fenomenologia associata a un incendio di rifiuti, risulta evidente quanto sia complessa l'elaborazione di un modello che riesca a delineare in modo efficace il termine sorgente di un incendio di cumulo e, come in tutte le situazioni in cui si vuole rappresentare la realtà attraverso dei modelli, si è reso necessario formulare alcune ipotesi che rendessero possibile la suddetta rappresentazione.

La prima ipotesi, quindi, è quella di trascurare le operazioni di intervento diretto e assumere che l'incendio vada avanti in autonomia; se invece si avesse un intervento indiretto, in linea teorica si potrebbe considerare solo l'area del cumulo che è stata isolata e che viene lasciata

bruciare liberamente e considerare solamente quella parte del cumulo. Nella realtà non è semplice fare delle ipotesi sull'effettiva area del cumulo che sta bruciando, a meno che i rifiuti non fossero preventivamente organizzati in compartimenti separati e sia nota l'area di ciascun compartimento, situazione che però si verifica di rado. In aggiunta, anche nel caso in cui siano distinguibili cumuli ben separati, è molto facile che l'incendio si propaghi nei cumuli adiacenti, soprattutto se il rifiuto considerato prende fuoco facilmente; quindi, non si considereranno nemmeno le operazioni di intervento indiretto e si ipotizzerà che l'incendio sia lasciato libero di esaurirsi autonomamente. La scelta di non considerare la fase di estinzione si è resa necessaria a causa della vastità dell'argomento trattato e della complessità della modellazione degli incendi; tuttavia, si è ritenuto importante sottolineare che è proprio in questa fase che si producono i composti più pericolosi (Arpa Piemonte, 2020).

Una seconda ipotesi è quella di esaminare solo la fase in cui l'incendio è pienamente sviluppato e si trova in condizioni stazionarie, così da calcolare i parametri caratteristici come la potenza emessa, la temperatura dei fumi e l'altezza dei fumi, solo in relazione a questa fase, quando la velocità di combustione massica per unità di superficie considerata può essere assunta costante. Si trascurano tutti i fenomeni che riguardano la fase di ignizione e di prima propagazione e questo può essere giustificato con due motivazioni:

1. la prima è che la durata di queste due fasi è trascurabile rispetto alla durata complessiva dell'incendio, che può arrivare ad essere di diversi giorni;
2. la seconda riguarda il quantitativo di sostanze emesse durante le primissime fasi dell'incendio, che è molto inferiore rispetto alla portata della nube che si osserva quando l'incendio è pienamente sviluppato, e quindi coinvolge una quantità di rifiuti molto maggiore rispetto alle prime fasi.

Immaginando di non considerare le operazioni di spegnimento, come è stato detto precedentemente, una volta che l'incendio si è sviluppato, prosegue finché è presente del combustibile che alimenta la reazione di combustione (si esclude quindi l'eventualità di un incendio sotto ventilato perché, come introdotto in premessa, si farà riferimento solo a incendi all'aria aperta). Quando il materiale disponibile per la combustione è in via di esaurimento, si entra nella fase di estinzione dell'incendio, caratterizzata da una diminuzione delle temperature e della potenza termica emessa. Questa diminuzione influenza la temperatura della nube, che avrà una spinta di galleggiamento inferiore e quindi, a parità di condizioni atmosferiche, una minore altezza di risalita, che spesso si traduce in un'area di ricaduta più prossima alla zona dell'incendio.

Una terza ipotesi riguarda la tipologia di incendi presi in esame; infatti, in questo lavoro si farà riferimento ad incendi di rifiuti che si trovano in aree di stoccaggio all'aperto. Alla base di questa scelta si ritrovano diverse motivazioni. Innanzitutto, incendi all'aperto e al chiuso sono due situazioni molto diverse che richiedono approfondimenti specifici ed è subito evidente che non possono essere descritte dal medesimo modello; al chiuso si hanno dispositivi antincendio, macchinari ed elementi strutturali, la ventilazione e altri fattori che influenzano l'evoluzione del fenomeno diversamente rispetto al caso all'aperto. La complessità dello scenario al chiuso, la necessità, in quel caso, di dover considerare anche i diversi tipi di materiali da costruzione e la mancanza di informazioni di questo genere all'interno delle relazioni tecniche (non era presente alcuna informazione sugli edifici, quando coinvolti), hanno portato alla scelta di considerare solamente incendi all'aperto.

Nel momento in cui è emersa la possibilità di utilizzare Phast, si è rivalutata l'opzione di considerare incendi al chiuso a causa della presenza di un "pacchetto" chiamato Warehouse, un'estensione presente nel software nata per la simulazione di incendi all'interno di magazzini

di stoccaggio di pesticidi. Il suo utilizzo è sembrato interessante per diversi motivi; innanzitutto perché permette di definire un materiale mediante la sua composizione atomica, inoltre perché questo materiale può essere sia un liquido che un solido granulare. Le informazioni su questa estensione sono molto poche, infatti nella sezione “Help” del software non sono presenti molte indicazioni, se non, appunto, quelle sopra riportate. La carenza di informazioni sia dal lato software sia dal lato incendi ha messo in luce quasi subito l'impossibilità di percorrere questa strada, che quindi è stata definitivamente abbandonata, confermando l'ipotesi di considerare soli incendi all'aperto.

Ricapitolando, lo studio riguarda esclusivamente incendi di rifiuti in plastica e legno (grazie a quanto dedotto dalle relazioni tecniche, escludendo la carta per indisponibilità dei dati) in luoghi all'aperto durante la fase in cui l'incendio è pienamente sviluppato, senza considerare gli interventi esterni volti al suo spegnimento.

Di seguito, si è scelto di dedicare un breve paragrafo alla combustione dei materiali solidi e all'influenza del processo di pirolisi a cui essi vanno incontro quando sottoposti ad alte temperature.

Perché è importante fare questa puntualizzazione?

Quando si è scelto di associare un incendio di rifiuti a un pool fire per poterlo simulare su Phast, il primo problema che è emerso è proprio quello relativo alla scelta del combustibile da utilizzare. Se da una parte si sta parlando di rifiuti, che di per sé sono molto complicati da caratterizzare, dall'altra ci si trova davanti a un'interfaccia che accetta solo sostanze liquide, per lo più appartenenti al settore petrolchimico. Era necessario trovare un punto di incontro, un parametro comune legato alla reazione di combustione, che permettesse di fare una prima associazione tra un rifiuto e un liquido, tale da portare a dei valori di output soddisfacenti; si è scelto il calore di combustione. Prima di arrivare a questa ipotesi, dal lato rifiuti sono state fatte numerose ricerche che, insieme alle informazioni derivanti dalle relazioni tecniche e dai documenti messi a disposizione da Arpa Piemonte, hanno permesso di escludere alcune categorie di rifiuti per poi concentrarsi principalmente su materiali di natura cartacea, plastica e ligneo-cellulosica.

4.2 Combustione materiali solidi

È noto come i combustibili possono essere classificati sulla base del loro stato fisico in solidi, liquidi e gassosi; i combustibili solidi a una certa temperatura emettono sostanze volatili infiammabili (gas di pirolisi) che, a contatto con l'ossigeno presente nell'aria, una volta raggiunta la temperatura di accensione, sviluppano una reazione di combustione con presenza di fiamma. Il calore prodotto in parte si disperde e in parte riscalda la restante massa di combustibile che decomponendosi emette ulteriori gas di pirolisi che alimentano ulteriormente la reazione di combustione. Una volta che i vapori infiammabili si sono esauriti, la massa di combustibile è ormai parzialmente ossidata e prosegue la combustione sotto forma di brace.

La combustione di materiali solidi dipende da diversi parametri come grado di porosità del materiale, contenuto di umidità, forma del materiale e pezzatura, cioè il rapporto tra il volume e la superficie esterna dell'oggetto in esame. A parità di cumulo considerato, nel caso in cui la pezzatura del materiale che lo compone è inferiore il rischio di incendio risulta maggiore; in aggiunta, nel caso di materiali di grossa pezzatura non è importante solo la presenza di innesco, ma ha un ruolo rilevante anche il tempo di esposizione del materiale alla sorgente di innesco.

La velocità di combustione dei materiali solidi è influenzata dalla loro tendenza a pirolizzare¹⁸ che permette di distinguere due classi di materiali: pirolizzanti e non pirolizzanti.

4.2.1 Sostanze solide pirolizzanti e non pirolizzanti

Alcune sostanze solide come polimeri termoindurenti, la maggior parte dei composti organici solidi come il legno e i tessuti organici, fanno parte dei charring materials, materiali pirolizzanti; ovvero materiali che vanno incontro a processi di carbonizzazione, rimanendo parzialmente ossidati a temperature che possono essere inferiori alla temperatura di combustione, e producendo dei gas di pirolisi che contengono composti organici volatili (syngas) e vapore acqueo. Per questi materiali, il meccanismo di carbonizzazione fa parte del normale processo di combustione e, ovviamente, lo influenza, in quanto la pirolisi lascia sul materiale uno strato di char (essenzialmente carbonio) che assorbe una parte del calore sviluppato dalla reazione di carbonizzazione, aumentando così la temperatura superficiale (Yang, H., and H. Chen., 2014) (Stoliarov et al., 2010). In figura 4.4 vengono riportate un paio di immagini che rappresentano dei materiali pirolizzanti sottoposti a un processo di combustione, durante il quale si ha formazione di char.



Figura 4. 4 Esempio di materiali pirolizzanti, formazione del char (Stoliarov et al., 2014)

I liquidi infiammabili e alcuni materiali solidi come le termoplastiche sono invece definiti come *'non charring materials'*, cioè materiali non pirolizzanti; questi combustibili raggiungono uno stato stazionario di combustione in poco tempo, dell'ordine dei secondi per i liquidi e dell'ordine dei minuti per i solidi, cioè uno stato in cui la potenza termica emessa raggiunge un valore massimo e costante nel tempo.

La produzione di char crea una barriera fisica superficiale che rallenta la fuoriuscita dei gas di pirolisi coinvolti nella reazione di combustione e generati dalla decomposizione termica del materiale, inoltre rappresenta anche una barriera isolante nei confronti del calore sviluppato dalla reazione e diretto verso la massa di combustibile. Un parametro importante da tenere in

¹⁸ La pirolisi è un processo di degradazione termochimica che vede esposto il materiale in questione (ad esempio il legno) ad alte temperature provocando il rilascio di sostanze quali gas e char (carbone vegetale), oltre che lo sviluppo di calore.

considerazione è il calore di gassificazione L^{19} , espresso in [kJ/g], che rappresenta l'energia necessaria per gassificare il combustibile, solido o liquido. In generale, i materiali non pirolizzanti hanno un comportamento a combustione molto simile ai combustibili liquidi, per i quali L è un valore univocamente determinato e facilmente consultabile. Nel caso di combustibili solidi (sia pirolizzanti che non), la presenza di additivi chimici e anche la forma fisica del materiale (che può essere sottoforma di solido compatto, schiuma, in forma granulare, ...) può modificarne il valore che varia all'interno di un certo range in funzione di questi fattori. Questa distinzione è importante perché il calore di gassificazione tende a crescere quando si passa da un liquido, a un solido non pirolizzante, ad ancora un solido pirolizzante, ostacolando quindi il processo di combustione.

A scopo esemplificativo, si riporta di seguito la tabella 4.1, contenente il valore del calore di gassificazione L per diverse tipologie di materiali, tra cui si trovano sia alcuni tra i combustibili liquidi disponibili nel database di Phast, sia anche diversi materiali solidi che possono essere presi come rappresentativi di alcune delle categorie di rifiuti che si possono trovare negli incendi occorsi di impianti di stoccaggio e/o trattamento rifiuti.

Tabella 4. 1 Calore di gassificazione di differenti sostanze e materiali (Quintiere, 2016)

Fuel	L (kJ/g)
Liquids:	
Gasoline	0.33
Hexane	0.45
Heptane	0.50
Kerosene	0.67
Ethanol	1.00
Methanol	1.23
Thermoplastics	
Polyethylene	1.8–3.6
Polypropylene	2.0–3.1
Polymethylmethacrylate	1.6–2.8
Nylon 6/6	2.4–3.8
Polystyrene foam	1.3–1.9
Flexible polyurethane foam	1.2–2.7
Char Formers	
Polyvinyl chloride	1.7–2.5
Rigid polyurethane foam	1.2–5.3
Whatman filter paper no.3	3.6
Corrugated paper	2.2
Woods	4–6.5

Sources: Data from Tewarson and Quintiere et al., Refs. 1 and 2.

4.3 Combustione di sostanze liquide e pool fire

Per quanto concerne la combustione delle sostanze liquide, uno scenario comune che si verifica è quello indicato con il nome di pool fire, o incendio di pozza.

Un pool fire si verifica quando:

¹⁹ In altri tesi viene indicato col simbolo λ , tuttavia, si è scelto di fare riferimento alla notazione utilizzata nel Quintiere, 2016.

- si ha sversamento di un liquido sul terreno (che può essere anche una vasca di contenimento costruita appositamente in caso di fuoriuscita) o sull'acqua, a seguito di una rottura del serbatoio di stoccaggio o di una tubazione;
- la pozza formatasi trova una sorgente di innesco e prende fuoco.

La rottura può essere catastrofica o limitata, causando un rilascio rispettivamente istantaneo o continuo; in aggiunta, la pozza che si crea non è necessariamente statica, può contrarsi o essere in espansione, magari per via dell'aggiunta di liquido o di altri materiali infiammabili (H. Longhua, 2017) (H. Yang, H. Chen, 2014).

I pool fire si verificano generalmente in ambito petrolchimico (perché associati per la maggior parte alla presenza di idrocarburi liquidi) e in spazi aperti; sono eventi difficilmente gestibili, influenzati dal vento e dalle condizioni atmosferiche.

Nel caso in cui il vento sia pressoché assente, le fiamme si innalzano verso l'alto seguendo la geometria della pozza, con un'inclinazione rispetto al terreno quasi nulla; si verifica quindi un rimescolamento dovuto alla presenza di vortici che derivano dalla natura turbolenta del fenomeno, ma le fiamme presentano un'estensione quasi esclusivamente in direzione verticale, senza allargarsi sul terreno circostante. La presenza del vento aumenta la turbolenza e il rimescolamento, incrementando quindi l'intensità dell'evento; in aggiunta, l'inclinazione della fiamma amplia il raggio del fenomeno perché è come se la base del pool fire aumentasse di diametro. Per visualizzare con più chiarezza la differenza tra le due situazioni, è possibile osservare la figura 4.5.

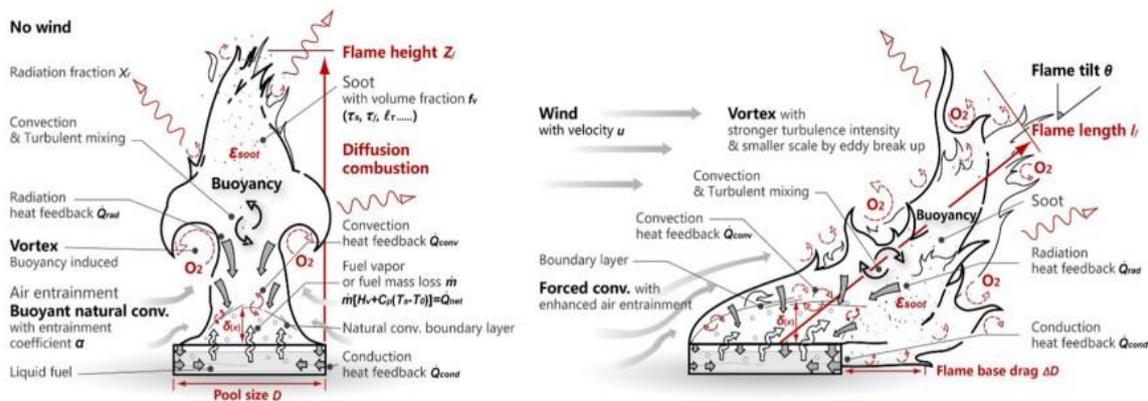


Figura 4. 5 Rappresentazione di un pool fire in assenza di vento (a sinistra) e in presenza di vento (a destra) (H. Longhua, 2017).

I parametri importanti da conoscere per avere una caratterizzazione completa di un pool fire sono i seguenti:

- l'inclinazione della fiamma rispetto all'asse verticale (tilt angle) α [°];
- l'altezza della fiamma misurata verticalmente rispetto alla superficie della pozza L_f [m];
- la velocità massica di combustione per unità di superficie \dot{m}'' [g/m²s], che di norma assume un valore costante oltre un certo diametro (affermazione che verrà approfondita di seguito);

- la potenza radiante E_f [kW/m²], ovvero la quota parte di potenza emessa nella forma di radiazione infrarossa (riferita all'unità di superficie della fiamma);
- la velocità di combustione massica \dot{m} [kg/s] (total mass rate).

4.3.1 Considerazioni sulla velocità massica di combustione

La velocità massica di combustione per unità di superficie \dot{m}'' [g/m²s] dipende dalle caratteristiche del combustibile (che si riflettono in entalpia di combustione, calore di vaporizzazione, calore specifico e temperatura di ebollizione) e dalle condizioni atmosferiche (Ditch et al., 2013). In letteratura esistono diversi studi sull'andamento della velocità massica di combustione per unità di superficie \dot{m}'' in funzione del diametro di pozza ed è stato osservato che il valore di questa grandezza ha un andamento crescente fino a diametri di circa 1 m, ma che poi tende a un valore asintotico costante che rimane invariato al crescere del diametro, come si può osservare dall'andamento dei valori sperimentali relativi a un pool fire di benzina, riportato in figura 4.6.

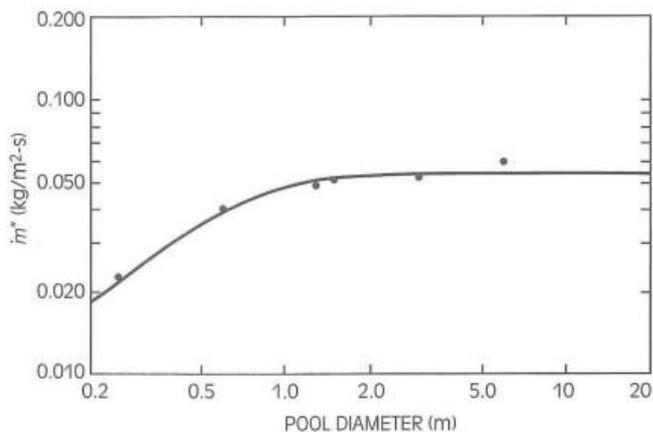


Figura 4. 6 Andamento della velocità massica di combustione per unità di superficie in riferimento a pool fire di benzina (Quincy, 1995).

Questo andamento è stato osservato anche durante uno studio condotto da Ditch et al. nel 2013 (Ditch et al., 2013), incentrato sull'indagare le caratteristiche di combustione di pool fire di diametri differenti formati da diverse tipologie di combustibili. Lo studio fa riferimento a situazioni di stato stazionario, dove l'apporto di combustibile è mantenuto costante rispetto alla velocità con cui esso evapora dalla superficie, ed ha permesso di ricavare una correlazione empirica per la stima della velocità massica di combustione per unità di superficie, che viene rappresentata in figura 4.7 dalle linee continue nei vari grafici.

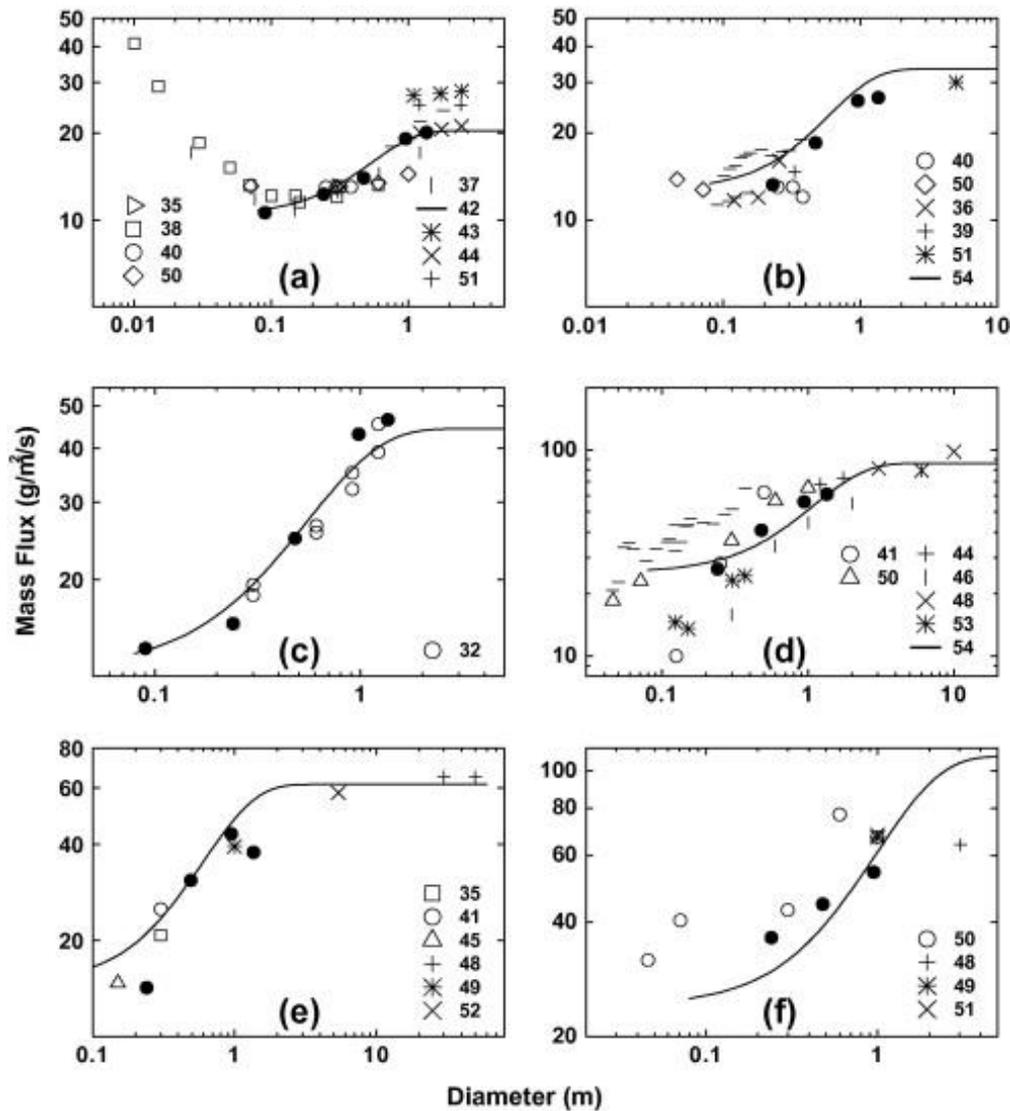


Figura 4. 7 Velocità di combustione massica per unità di superficie in funzione del diametro della pool per: (a) metanolo; (b) etanolo; (c) 72,4% metanolo e 27,6% toluene; (d) eptano; (e) JP-8 (cherosene); e (f) toluene. I cerchi pieni rappresentano i risultati dello studio condotto da Ditch et al. (Ditch et al, 2013); i simboli aperti e lineari indicano, rispettivamente, prove in cui il livello del carburante è stato o non è stato controllato. I numeri in ogni legenda sono i numeri di riferimento associati ai dati utilizzati all'interno dello studio stesso. I risultati della correlazione empirica derivata in questo studio sono mostrati come linee continue.

Dall'osservazione dei grafici in figura 4.7 si nota che la velocità massica di combustione inizialmente ha un andamento crescente in funzione del diametro ma, dopo un certo valore di questi 'ultimo, si mantiene costante e il suo valore non varia nonostante l'aumento del diametro continui.

Un'importante ipotesi supportata da questo studio afferma che la velocità di combustione in regime stazionario associata a pool fire in condizioni di ambiente quiescente è governata principalmente da tre aspetti:

1. diametro del pool fire;
2. il calore di gassificazione del combustibile considerato;

3. la presenza di fuliggine associata alla fiamma.

È stato osservato che al di sopra di un dato diametro, che può variare a seconda del combustibile considerato, la velocità massica di combustione per unità di superficie assume un valore costante. Non è stato approfondito l'aspetto riguardante la presenza di fuliggine associata alla fiamma; tuttavia, si è ritenuto importante l'approfondimento del secondo punto, riguardante il calore di gassificazione del combustibile considerato. Questo secondo aspetto è stato ripreso in seguito e questa scelta deriva dal fatto che nel momento in cui si è pensato di paragonare la combustione di un liquido a quella di un solido eterogeneo, è risultata evidente l'influenza del calore di gassificazione, che assume valori molto maggiori per combustibili solidi rispetto a quanto osservato nei combustibili liquidi.

Riprendendo il discorso relativo alla velocità massica di combustione per unità di superficie, si è pensato che il plateau raggiunto dalla velocità massica di combustione per unità di superficie potrebbe essere giustificato dallo sviluppo di un andamento turbolento che caratterizza le fiamme associate a pool fire quando questi hanno dei diametri dell'ordine del metro, che è proprio l'ordine di grandezza associato al raggiungimento di un valore costante.

Un ulteriore aspetto da non trascurare riguarda la tipologia di prove sperimentali che ha portato a questi risultati e l'ambiente in cui sono state condotte. Spesso i test di prova eseguiti in laboratorio non tengono conto di quali sono le reali condizioni atmosferiche presenti durante questo genere di eventi, trascurando quindi l'influenza del vento, della temperatura, della stagionalità. Per questo motivo, si è ritenuto interessante spendere del tempo per parlare brevemente dell'influenza del vento sulla velocità massica di combustione per unità di superficie, soprattutto perché, dalle ricerche effettuate, sono emersi pareri contrastanti.

4.3.2 *Influenza del vento sulla velocità massica di combustione per unità di superficie associata a un pool fire*

L'effetto del vento sulla velocità massica di combustione \dot{m}'' [g/m²s] è stato ampiamente studiato negli ultimi decenni, ma ad oggi non è stata raggiunta una visione comune (Yao et al., 2019). In assenza di vento le fiamme diffusive sono controllate dalla spinta di galleggiamento che deriva dalla differenza di densità tra i fumi caldi di combustione e l'aria ambiente circostante, i pennacchi di fumo salgono verticalmente e nel farlo si raffreddano, scambiando calore con l'atmosfera circostante. In presenza di vento le fiamme hanno un certo grado di inclinazione rispetto alla superficie orizzontale del terreno (come precedentemente mostrato in figura 4.1), il meccanismo di scambio diventa più complesso perché queste interagiscono con la superficie della pool e inoltre anche la galleggiabilità è influenzata dalle forze d'inerzia del vento, che si aggiungono alla spinta dovuta alla differenza di densità.

L'aumento velocità massica di combustione \dot{m}'' all'aumentare del vento viene spiegato dai sostenitori di questa teoria attraverso due meccanismi. Il primo è l'incremento del calore scambiato con meccanismo conduttivo sul bordo della pool, il secondo è l'incremento del calore scambiato con meccanismo convettivo ma sull'intera superficie di contatto tra la pozza di combustibile e le fiamme soprastanti; questo perché lo spessore dello strato convettivo, nel caso di convezione forzata dovuta al vento, risulta inferiore rispetto a quello che si avrebbe nel caso di convezione naturale, con un conseguente aumento del coefficiente di heat-transfer h [W/m²K]. Al contrario, gli studi che dimostrano un comportamento opposto, e quindi una diminuzione della velocità massica di combustione \dot{m}'' all'aumentare della velocità del vento, spiegano questo comportamento mediante la diminuzione del flusso di calore radiante dalla fiamma verso la superficie della pool a causa di un fattore di vista ridotto. La quantità degli

studi a supporto della prima tesi è superiore, ma questo non significa che la seconda non sia altrettanto valida. In aggiunta, gli studi che supportano l'aumento di \dot{m}'' con l'aumento della velocità del vento sono stati prevalentemente condotti in pool fire di piccola scala, con diametri inferiori ai 0.3 m; in questo range si ha un regime di transizione che tende ad essere laminare al diminuire del diametro della pool, questo per rimarcare che i dati dei test antincendio svolti su pool di piccola scala non possono essere pienamente rappresentativi anche per i pool di larga scala, dove entrano in gioco meccanismi differenti e per i quali serviranno studi più approfonditi ad hoc.

Queste considerazioni sulla velocità massica di combustione non sono da considerarsi esaustive, ma si è scelto di inserirle come spunto di riflessione perché evidenziano la complessità dell'argomento e le numerose variabili che possono influenzare i risultati raggiunti.

4.4 Introduzione a Phast

Una volta effettuata una descrizione fenomenologica di un incendio di cumulo e aver circoscritto i limiti del problema grazie alla formulazione delle ipotesi contenute nella sezione precedente, si sono fatte delle ricerche per comprendere se fossero disponibili dei modelli adatti alla descrizione di tale fenomeno. Non si sono trovati dei software appositi che permettessero di simulare incendi di rifiuti; tuttavia, avendo a disposizione il software Phast all'interno delle strutture dell'Ente presso cui si è svolto il lavoro di tesi, è stato proposto dall'Ente stesso l'utilizzo di tale software, nonostante fosse evidente fin da subito che questo non fosse lo strumento più adatto a tale modellazione. Per confermare o smentire questa ipotesi secondo cui Phast non è lo strumento più adatto alla modellazione del termine sorgente di un incendio di rifiuti, si è reso necessario l'utilizzo di tale software e, a tal fine, di seguito viene fatta una breve descrizione di tale strumento.

Il pacchetto software Phast (DNV, Det Norske Veritas – Software, 2019) (Witlox et al., 2017) è uno strumento utilizzato nell'ambito dell'ingegneria della sicurezza per la valutazione dei rischi delle attività industriali e per la determinazione dell'entità delle conseguenze causate da eventi incidentali (come rilasci, incendi o esplosioni); consente quindi di comprendere l'entità e la gravità di possibili scenari che coinvolgono sostanze tossiche e infiammabili. Può essere utilizzato in diversi ambiti riguardanti industrie di processo legate all'utilizzo e al trattamento di petrolio, gas, industrie nel settore chimico e petrolchimico, processi di transizione energetica e tante altre. Nel software è possibile selezionare diverse tipologie di eventi come scarico in atmosfera con dispersione di sostanza tossiche e/o infiammabili, incendi ed esplosioni.

La modellazione avviene per step successivi descritti di seguito:

1. Rilascio in atmosfera

In questa categoria rientrano i rilasci di liquidi sottoraffreddati, fluidi surriscaldati o pressurizzati (con il calcolo dell'espansione dovuta al rilascio in atmosfera). Il rilascio può avvenire in continuo oppure essere istantaneo; gli scenari che rientrano in questa categoria includono perdite o rotture catastrofiche annesse a tubazioni o recipienti (vessel), ma anche rilasci di nubi di fumo in atmosfera a seguito di incendi.

2. Dispersione

La dispersione di una sostanza in ambiente dipende fortemente dalle condizioni meteorologiche e dalla direzione del vento. Tra gli scenari sono inclusi la dispersione in seguito a rilasci di gas in pressione (jet release), dispersione di gas con una densità differente da quella dell'aria, e rilasci di fluidi bifasici, in cui viene calcolata la ricaduta delle goccioline di liquido, con conseguente accumulo in una pozza a cui segue la

successiva rievaporazione di parte di essa con formazione di una nube di vapore (che poi può disperdersi ulteriormente o, se la sostanza è infiammabile e trova un innesco, prende fuoco).

3. Calcolo delle conseguenze per sostanze tossiche e/o infiammabili

Gli scenari incidentali considerati sono jet-fire, derivanti da rilasci di sostanze infiammabili pressurizzate; pool-fire, che durante la combustione possono innalzarsi a causa della spinta ascensionale che deriva dalla differenza di densità con l'atmosfera circostante; ed esplosione o combustione di nubi formate dal vapore delle sostanze infiammabili (vapour cloud fires or explosions).

Per le finalità del presente lavoro, si sono lasciati da parte gli scenari riguardanti scarico in atmosfera, dispersione di sostanze tossiche o infiammabili ed esplosioni e ci si è soffermati sugli incendi, per i quali, all'interno del Phast, sono disponibili i seguenti modelli:

- flash fire: si consideri rilascio di una sostanza infiammabile in atmosfera, caratterizzata da una temperatura inferiore a quella atmosferica, la quale vaporizza rapidamente (flash). La nube di vapori combustibili, in assenza di innesco, si miscela con l'aria circostante propagandosi trasportata dal vento. Il flash fire si verifica quando la nube trova una sorgente di innesco e la fiamma si propaga rapidamente fino alla sorgente di rilascio; se questa è rappresentata da una pozza di liquido il fenomeno può trasformarsi ed evolvere in un pool fire, mantenendo comunque un effetto non esplosivo;
- jet fire: si tratta di un particolare tipo di incendio che si verifica in seguito a una perdita di gas infiammabile in pressione da una tubazione, da un serbatoio o da una flangia mal posizionata, che in presenza di innesco prende fuoco ed è caratterizzato da una combustione turbolenta, che può facilmente investire degli ostacoli che si trovano nelle vicinanze, causando un effetto domino;
- fireball: il fireball si verifica in seguito al cedimento di un serbatoio contenente un gas infiammabile liquefatto sotto pressione. Il cedimento causa l'espansione del gas liquefatto che passa in fase vapore istantaneamente, formando una nube di vapori infiammabili che, in seguito a innesco, inizia a bruciare prima che essa si sia miscelata con aria;
- pool fire: un pool fire è un incendio di pozza che coinvolge un liquido infiammabile che può essere ad esempio metanolo, benzina, o un qualsiasi tipo di combustibile, idrocarburico e non (la descrizione procede successivamente).

Tra questi si è scelto di prendere in considerazione un pool fire e l'idea deriva principalmente da una similitudine di tipo visivo con gli incendi di cumulo; infatti, se si immagina un cumulo di rifiuti che brucia, tra gli scenari presenti su Phast, quello più simile è proprio un pool fire, e quindi un incendio esteso, con fiamme distribuite sulla superficie, dalle quali si innalza una nube di fumi di combustione che poi si disperde nello spazio circostante.

Questa similitudine permetterebbe di equiparare le conseguenze generate dalla combustione di una pozza di liquido infiammabile, di natura nota, che occupa un'area confinata di forma circolare, a quelle generate dalla combustione incontrollata di una massa solida, non omogenea, non uniforme, costituita da tanti materiali diversi e di cui non è possibile avere delle informazioni precise riguardanti la composizione, la quantità esatta, la disposizione nello spazio, ma anche il comportamento al fuoco, tra le altre cose. L'idea della similitudine tra una pozza di liquido infiammabile e un incendio di cumulo è azzardata ma innovativa e non si ha alcuna certezza sull'adeguatezza di quest'ipotesi; tuttavia, è proprio questo l'obiettivo del lavoro di tesi e si avrà chiarezza su questa questione una volta analizzati i risultati raggiunti.

4.5 I pool fire in Phast

La versione disponibile di Phast è la 8.23 (DNV, Det Norske Veritas – Software, 2019), che prevede la modellazione del pool fire come un cilindro inclinato nella direzione del vento, caratterizzato da un angolo di inclinazione rispetto all'asse verticale (tilt angle), da un diametro D e da un'altezza H , come mostrato nella figura sottostante (figura 4.8).

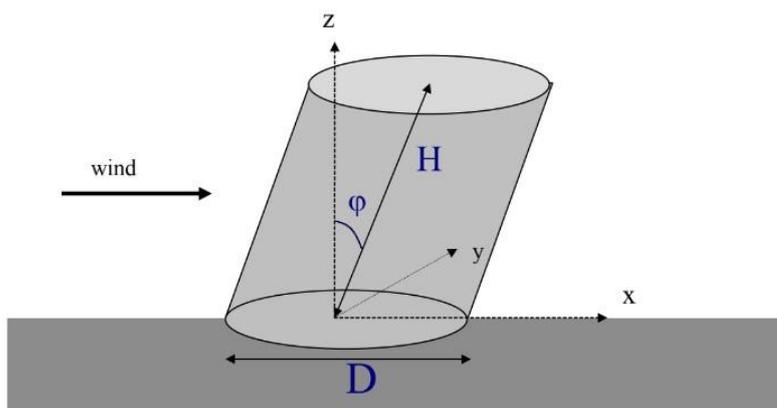


Figura 4. 8 Rappresentazione del modello di schematizzazione di un pool fire su Phast.

Le coordinate di riferimento sono di tipo cartesiano, dove x rappresenta la direzione del vento (sottovento), y la direzione trasversale rispetto a quella di moto del vento e la coordinata z indica l'altezza dal suolo.

In linea generale, i modelli empirici utilizzati per la modellazione di fireballs, jet fires e pool fires permettono di descrivere la geometria delle fiamme (generalmente associata a una sfera, a un cono o a un cilindro, e quindi geometrie solide note) e la radiazione emessa per unità di superficie; da cui è possibile calcolare la potenza che investe un ostacolo posto a una certa distanza e a una certa angolazione rispetto alla sorgente, e quindi calcolare i danni causati a un soggetto sensibile situato nelle zone circostanti in termini di letalità.

Per la modellazione dei pool fires, i codici di Phast© prendono come riferimento il modello descritto da Johnson et al. nel 1992 (Johnson, A.D., 1992), sviluppato a partire da dati relativi a pool fires di LNG (Liquefied Natural Gas). Si tratta di un modello semi-empirico secondo cui è possibile dividere la fiamma in due zone, la prima, alla base, è caratterizzata da un alto potere emissivo ed è molto luminosa, la seconda invece, sovrastante la prima, è costituita da uno strato fumoso e oscurato, con un potere emissivo trascurabile rispetto al primo. La scelta e lo sviluppo delle correlazioni caratteristiche del modello sono stati possibili grazie alla disponibilità di un ampio data set relativo a pool fire di sostanze idrocarburiche, che conteneva informazioni quali tipologia di idrocarburo coinvolto, velocità di combustione e potenza superficiale emessa durante l'evento. All'interno del lavoro viene evidenziato che purtroppo il modello risulta impreciso e carente in due casi:

- quando viene applicato a pool fire di larga scala soggetti a condizioni atmosferiche durante le quali si ha una forte presenza di vento;

- quando si calcola la radiazione incidente su ostacoli troppo vicini alla superficie della fiamma.

Consci di queste limitazioni, passiamo adesso all'analisi dei parametri richiesti per l'avvio di una simulazione.

Per quanto concerne i parametri di input, questi si ripartiscono in tre categorie: ambient data, pool data e fuel properties. I dati relativi alle prime due categorie possono essere impostati dall'utente mentre le proprietà del combustibile vengono automaticamente pre-impostate dal programma, anche se in alcuni casi possono essere fatte delle modifiche riguardanti il modello termodinamico utilizzato per ricavarle. Per ulteriori approfondimenti, si rimanda alle informazioni riportate in Appendice.

In nessuna di queste categorie si fa riferimento alla durata complessiva del fenomeno, né viene calcolata come output. Phast è uno strumento di analisi quantitativa dei rischi e permette di effettuare un calcolo delle conseguenze; per questo motivo l'unico riferimento al tempo durante l'impostazione dei parametri di input riguarda il tempo di esposizione, compreso tra 0 e 90 secondi, usato per valutare i danni a un soggetto che si trova esposto al pool fire. In particolare, il software fornisce il calcolo dell'irraggiamento termico a cui il bersaglio viene esposto, in termini di letalità, per il tempo impostato, che è pensato come tempo trascorso dal soggetto all'interno del raggio di un certo livello di radiazione (ne sono impostabili tre differenti) prima che possa tentare di fuggire e allontanarsi.

Per quanto riguarda invece i parametri di output, quali, ad esempio, la velocità di combustione, la geometria della fiamma e la potenza emessa dalla fiamma per unità di superficie, questi non sono calcolati in maniera puntuale, istante per istante, ma viene fornito un unico valore che è mediato su tutta la durata del fenomeno. La variabile tempo non viene quindi presa in considerazione, se non in termini di tempo di esposizione, che però non è utile ai fini di questo lavoro. Dallo studio del software emerge che Phast non fornisce le informazioni necessarie alla modellazione del termine sorgente perché ha un'impostazione di calcolo totalmente diversa e quindi non è adatto alla descrizione di un incendio di cumulo in questo senso.

4.6 Presentazione del modello implementato su Excel con le relative equazioni

In letteratura non è presente un modello fenomenologico completo che descriva la combustione di rifiuti; tuttavia, sono state trovate alcune correlazioni e alcuni elementi che nel loro insieme hanno permesso di strutturare un modello ex-novo chiamato "Incendio di cumulo", che è stato implementato su Microsoft Excel (versione 2022). Tale modello si basa in gran parte sulle procedure e sulle equazioni riportate all'interno dei capitoli 6 e 7 del libro "Principles of fire behaviour" (Quintiere, 2016), e viene utilizzato come metodo di confronto rispetto ai risultati forniti in output da Phast.

Il modello è circoscritto ai casi che rientrano nelle ipotesi formulate a valle della fenomenologia, è quindi adatto alla descrizione di incendi di cumulo all'aperto dei quali si considera la fase stazionaria in cui la velocità massica di combustione \dot{m}'' [g/m²s] è costante e il cui valore fa riferimento a quanto trovato in letteratura (Quintiere, 2016). Le equazioni forniscono:

- potenza emessa \dot{Q} [kW];
- altezza raggiunta dalle fiamme L_f [m];
- temperatura T [°C], calcolata attraverso una procedura grafica descritta successivamente.

Sebbene il modello sorgente per essere completo preveda anche l'analisi della portata e della composizione dei fumi, questi aspetti non verranno approfonditi all'interno di questo elaborato, ma saranno oggetti di studi successivi. I valori ottenuti di queste grandezze verranno confrontati con quanto ricavato dagli output di Phast; in aggiunta, sempre all'interno del capitolo 6 del Quintiere (Quintiere, 2016), sono presenti alcune tabelle relative a grandezze quali la massima velocità di combustione per unità di superficie \dot{m}'' e il potere calorifico effettivo ΔH_C di diverse sostanze liquide e materiali solidi, che sono utili per il calcolo della potenza emessa \dot{Q} e dell'altezza raggiunta dalle fiamme L_f .

La massima velocità di combustione per unità di superficie, che è quindi una grandezza tabulata, verrà successivamente confrontata con il valore che può essere ricavato dalle simulazioni, dividendo la total burn rate \dot{m} , fornita in output dal programma, per la superficie occupata dal pool fire A [m²].

Entriamo meglio nel dettaglio di queste grandezze, approfondendone alcuni aspetti legati soprattutto alla differenza che emerge tra combustibile solido e combustibile liquido.

4.6.1 Potenza emessa \dot{Q}

La potenza emessa rappresenta l'energia totale prodotta dalla combustione per unità di tempo e viene misurata in kilowatt; è importante perché è rappresentativa della grandezza dell'incendio e della portata dei potenziali danni che questo può causare. Può essere espressa come:

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A \Delta H_C \quad (4.1)$$

Dove:

- \dot{m}'' [g/m²s] è la velocità massica di combustione per unità di superficie;
- A [m²] rappresenta l'area coinvolta nella combustione, che è pari all'area totale del pool fire (nel caso di combustibili liquidi) o alla superficie totale del cumulo di materiale considerato (nel caso di combustibili solidi);
- ΔH_C [kJ/g] è il calore effettivo di combustione.

Il calore effettivo di combustione ΔH_C , richiesto all'interno dell'equazione (4.1), assume dei valori differenti a seconda che si consideri il periodo di combustione in cui sono presenti fiamme pienamente sviluppate o quello caratterizzato da una combustione fumosa e senza fiamma che coinvolge il char, cioè un prodotto di pirolisi tipico dei combustibili solidi. In entrambi i casi, il calore di combustione effettivo fa riferimento a una condizione reale e assume un valore diverso rispetto al calore di combustione ΔH , che invece è misurato sotto condizioni ideali di combustione; per questo motivo si farà sempre riferimento al calore effettivo di combustione ΔH_C . Il valore di ΔH_C può essere influenzato da diversi fattori, come la presenza di additivi chimici o di ritardanti, produzione del char, e altri, che quindi rendono difficile prevederne il valore; è per questo che per avere maggiore accuratezza sarebbe opportuno fare delle misurazioni apposite per ciascun materiale che si sta considerando. All'interno di questo elaborato si farà sempre riferimento ai valori riportati in tabella 4.2.

Tabella 4. 2 Calore effettivo di combustione ΔH_C di varie sostanze e materiali (Quintiere, 2016).

Table 6-3 Effective heat of combustion, ΔH_c (kJ/g).

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

4.6.2 Velocità massica di combustione

Per quanto concerne la velocità massica di combustione invece, esistono dei valori tabulati con riferimento al suo massimo valore, ma è interessante riportare la formula predittiva generale (equazione (4.2)) con la quale può essere ricavata:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}''}{L} \quad (4.2)$$

Nella quale:

- \dot{q}'' [kW/m²] è il flusso netto di calore che investe la superficie del combustibile (che sia esso solido o liquido);
- L [kJ/g] rappresenta il calore di gassificazione.

L'equazione (4.2) descrive la velocità massica di combustione durante uno stato stazionario e fa riferimento a sostanze liquide o combustibili solidi che rientrano nella categoria dei materiali non pirolizzanti. Esiste una seconda categoria di materiali, detti pirolizzanti, per i quali questa formula (equazione (4.2)) è applicabile per avere una stima della velocità di combustione, che però può oscillare entro un certo range attorno al valore ottenuto. La differenza tra queste diverse categorie di materiali si rispecchia nel valore assunto dal calore di gassificazione L , che influenza anche la velocità massica di combustione e la potenza emessa.

La quantità di materiali coinvolti rimaneva comunque troppo ampia, e a questo punto sono entrati in gioco i dati tabulati riportati sul Quintiere. È stato fatto un controllo incrociato tra la disponibilità dei dati relativi al calore effettivo di combustione e alla velocità massica per unità di superficie massima, e le sostanze presenti sul Phast; questo perché in assenza di questi dati non sarebbe stato possibile effettuare alcuna verifica sui risultati, e quindi nessuna validazione degli stessi. Durante questo confronto, si è scelto di passare dal considerare il calore di

combustione ΔH al calore effettivo di combustione ΔH_C , sia perché si ritiene sia un parametro più veritiero rispetto alla situazione che si sta cercando di descrivere, sia perché è la grandezza utilizzata all'interno delle equazioni utilizzate nel modello sviluppato su Excel.

Proseguendo con le ricerche, è emerso che il calore effettivo di combustione è sicuramente un parametro importante; tuttavia, nel momento in cui si vuole confrontare il comportamento di una sostanza solida e di una sostanza liquida, emerge un secondo parametro caratteristico che influenza notevolmente la fenomenologia e i tempi di combustione, che è appunto il calore di gassificazione L . questa grandezza influenza la velocità massica di combustione per unità di superficie m e quindi, a parità di ΔH_C , anche la potenza emessa \dot{Q} .

Alla luce di queste osservazioni, si è scelto di riportare di seguito un breve inciso riguardante la differenza tra sostanze solide pirolizzanti, non pirolizzanti e sostanze liquide, in riferimento al loro comportamento durante il processo di combustione.

4.6.3 Altezza raggiunta dalle fiamme

Quando si parla di fiamme²⁰ si intende il pennacchio costituito da quelle che comunemente sono indicate come “fiamme” unitamente ai prodotti di combustione caldi che stanno al di sopra della fonte di combustibile, essendo più leggeri. L'aria circostante, fredda rispetto ai gas caldi, viene introdotta all'interno del pennacchio con un processo chiamato trascinamento; la velocità del flusso di trascinamento influenza l'altezza e le caratteristiche della fiamma. Una fiamma è instabile, in continuo movimento, e caratterizzata da un regime turbolento; perciò, presenta delle fluttuazioni più o meno marcate influenzate dal vento e dalle condizioni atmosferiche.

Il calcolo dell'altezza della fiamma è quindi un calcolo approssimativo e non è da intendersi come un risultato preciso; inizialmente, per effettuarlo si è pensato di usare la correlazione empirica sviluppata da Heskestad et al. (Heskestad et al., 1991) e rappresentata dalla seguente equazione (equazione (4.3)), che riferimento a fuochi simmetrici da fonti di carburante di forma circolare e orizzontali (vedere figura 4.9), cioè dei pool fire:

$$L_f = 0.23 \times \dot{Q}^{2/3} - 1.02 D \quad (4.3)$$

È stato dimostrato che l'equazione (4.3) è applicabile anche a combustibili solidi disposti in forma simmetrica e orizzontalmente rispetto al terreno; per i quali è predominante l'effetto di galleggiamento e in assenza di vento. Data l'ipotesi di assenza di vento, che non rispecchia quanto verrà simulato in Phast, probabilmente i valori di altezza ottenuti utilizzando l'equazione (4.3) saranno maggiori rispetto a quelli indicati dal software perché la presenza del vento inclinerà la fiamma verso una certa direzione, influenzandone la forma e quindi l'altezza.

²⁰ Sorgente di calore e di luce costituita da masse gassose ottenute, generalmente, per combustione di sostanze solide o liquide o gassose (il comburente è di solito l'ossigeno dell'aria), che presenta una forma caratteristica, con una zona esterna, poco luminosa e molto calda, ove si ha combustione completa, una intermedia, molto luminosa, a combustione incompleta, e una interna (zona di trasporto), in cui non si ha combustione ma solo afflusso di gas. (Treccani, 2022)

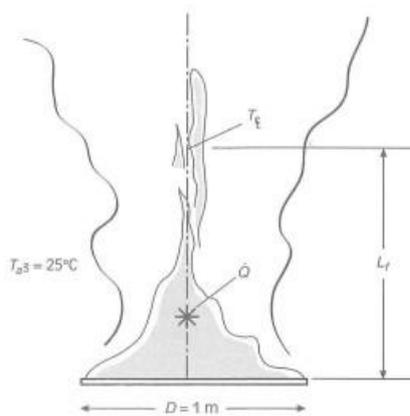


Figura 4.9 Visualizzazione fiamma. L'altezza della fiamma è misurata a partire dal punto di interfaccia tra il combustibile e la fiamma da esso sviluppata, in direzione perpendicolare al terreno; la stima della temperatura invece fa riferimento all'apice della fiamma, nel punto di altezza corrispondente a L_f . (Quintiere, 2016)

Purtroppo, il campo di validità della formula è molto limitato, infatti essa è utilizzabile solo quando il fattore \dot{Q}^* , pari a $\frac{\dot{Q}[kW]}{1101 \times (D[m])^{2/5}}$, è compreso nell'intervallo $[0,5 ; 100]$ ed eseguendo le dovute verifiche, si è riscontrato che i casi considerati nelle simulazioni non rientrano all'interno di questo range; pertanto, l'equazione (4.3) non è stata utilizzata.

Approfondendo l'argomento, in letteratura è stata trovata una correlazione interessante studiata da Pritchard e Binding (Pritchard, M. J et al., 1992), che permette di ottenere l'altezza della parte luminosa della fiamma tenendo in considerazione sia la velocità del vento che la composizione (in termini di rapporto C/H) del materiale combustibile considerato. Questa correlazione verrà presentata nel Capitolo successivo ma è valida solo per combustibili di natura idrocarburica e, inoltre, richiede ulteriori passaggi prima di essere utilizzata perché al suo interno sono presenti dei parametri adimensionali non direttamente rilevati dagli strumenti di misura visti al capitolo precedente. Per questo motivo, si è scelto di utilizzare una correlazione alternativa presentata all'interno del lavoro di Rew et al. (Rew et al., 1997), ricavata da Ditali et al., la quale è di più immediato utilizzo. Ulteriori considerazioni verranno esplicitate in seguito, nel successivo capitolo.

4.6.4 Temperatura

Nonostante questo dato non venga fornito da Phast, si è scelto di effettuare anche il calcolo della differenza di temperatura tra la fiamma T_{CL} , nel punto indicato in figura 4.9, e la temperatura atmosferica T_a , per poi ottenere T_{CL} , un dato fondamentale per fare delle considerazioni successive riguardanti la dispersione della nube dei fumi in atmosfera.

Per questo calcolo è stata utilizzata la procedura grafica descritta all'interno del capitolo 7 del libro "Principles of fire behaviour" (Quintiere, 2016), attraverso l'utilizzo di un diagramma che presenta in ascisse il fattore $z/\dot{Q}^{2/5}$, espresso in $[m/kW^{2/5}]$ e in ordinate la differenza di temperatura $T_{CL} - T_a$ [°C]. La procedura prevede di porre z pari a L_f , calcolare poi il fattore $z/\dot{Q}^{2/5}$, e riportarlo sull'asse delle ascisse. Tracciando la verticale, si interseca la curva sperimentale ottenuta mediante l'interpolazione di dati reali; l'ordinata del punto di intersezione corrisponde alla differenza di temperatura $T_{CL} - T_a$ [°C].

4.6.5 Area

Per avere un'idea dell'ordine di grandezza delle aree interessate dagli incendi di rifiuti sono stati ricercati i valori relativi agli incendi occorsi presentati all'interno del capitolo 3, ma i dati sulle aree interessate dagli incendi non erano disponibili. Per sopperire a questa mancanza si sono prese come riferimento le aree riportate all'interno delle Regole tecniche verticali (Ministero dell'Interno, 2022), tenendo in considerazione anche i valori di alcuni lotti di stoccaggio riportati all'interno dell'allegato C2 di una ditta piemontese che si occupa dello stoccaggio di rifiuti, la quale non rientrava però tra i casi di incendi occorsi.

Le RTV di interesse per questo lavoro sono state approvate mediante decreto il 26 luglio 2022 e *“si applicano agli stabilimenti e impianti che effettuano stoccaggio dei rifiuti in via esclusiva o a servizio degli impianti di trattamento di rifiuti, esclusi i rifiuti inerti e radioattivi, nonché ai centri di raccolta di rifiuti di superficie superiore a 3.000 m²”*, ed entreranno in vigore a partire dal novantesimo giorno dopo la data di pubblicazione nella Gazzetta Ufficiale, avvenuta l'11 agosto 2022. All'interno dell'allegato 1 della RTV, al paragrafo 5.3.2 *“Procedura per la determinazione tabellare della distanza di separazione”* sono riportate le disposizioni in termini di distanze di separazione, dimensioni massime, volume e inclinazione dei singoli cumuli relativamente agli stoccaggi all'aperto; da queste emerge che un singolo cumulo può avere una lunghezza massima di 50 m ed una larghezza massima pari a 20 m *“qualora sia garantita l'accessibilità ai soccorritori ad entrambi i lati dell'accumulo”*, pari a 10 m *“in caso di accessibilità garantita su un solo lato”*. Tralasciando le indicazioni sull'altezza, che dipende dalla tipologia di rifiuti e deve tener conto anche del massimo carico di incendio consentito, se si prende come riferimento l'area massima autorizzabile secondo queste disposizioni, si ottiene una superficie pari a 1000 m²; questo valore rappresenta la superficie massima occupata da un cumulo di rifiuti stoccato all'aperto.

Gli impianti che trattano rifiuti sono suddivisi in aree (o lotti) e alcune di queste sono destinate allo stoccaggio dei rifiuti; al loro interno sono quindi presenti molti cumuli di rifiuti e la superficie totale occupata da rifiuti non si limita ai 1000 m² ma può essere molto più ampia. Per avere un'idea di quanto può essere vasta un'area di stoccaggio, si è pensato di prendere come riferimento la metratura riportata all'interno della documentazione associata a un impianto di stoccaggio rifiuti situato in provincia di Torino; dalla consultazione di quest'ultima è emerso che le aree possono essere suddivise per funzione o per tipologia di rifiuti stoccati, e possono occupare superfici molto ampie, di oltre 35000 m². Nella tabella seguente (tabella 4.3) si riportano alcuni esempi di valori di aree e i rispettivi diametri equivalenti, nell'ipotesi che l'area interessata dall'incendio abbia una forma circolare:

Tabella 4.3 Valori di aree corrispondenti diametri.

Area [m ²]	Diametro [m]
50	7,978845608
100	11,28379167
250	17,84124116
1000	35,68248232
5000	79,78845608
10000	112,8379167

25000	178,4124116
40000	225,6758334

Questa scelta presenta diversi vantaggi:

1. generalizzazione del modello; questo, infatti, viene applicato a situazioni molto diverse e può essere utilizzato sia quando son presenti degli incendi localizzati nei singoli cumuli, sia nel momento in cui tutta l'area di stoccaggio è interessata dalle fiamme;
2. mette in luce le differenze che emergono e quali parametri invece rimangono circa costanti

Una volta stabilite le aree di riferimento, è possibile ricavare un'espressione per il calcolo del diametro equivalente (equazione (4.4)), ipotizzando che l'area considerata sia di forma circolare:

$$D_{pool} = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}} \quad (4.4)$$

I valori dei diametri sono stati poi utilizzati per effettuare le simulazioni su Phast, essendo questi pari al diametro del pool fire D_{pool} .

4.7 Considerazioni conclusive al capitolo

All'interno di questo quarto capitolo è stata fatta una descrizione generale della fenomenologia che caratterizza gli incendi di rifiuti con l'intento di evidenziare sia le difficoltà riscontrate durante l'approccio al problema, sia le ipotesi che sono state fatte al fine di poter ottenere dei risultati che fossero soddisfacenti.

È stata poi dedicata una sezione importante alla descrizione dei pool fire sia in termini di fenomenologia sia in termini di grandezze utili per la loro rappresentazione all'interno del software di simulazione Phast, al quale son stati dedicati diversi paragrafi.

Infine, sono state presentate diverse equazioni utilizzate nell'approccio modellistico implementato su Excel e utilizzato per un confronto dei risultati, sono state analizzate le grandezze costituenti le equazioni precedentemente citate al fine di mettere in luce l'influenza che queste possono avere nella determinazione dei parametri di confronto, quali la potenza emessa, la potenza emessa per unità di superficie considerata e la temperatura raggiunta dalle fiamme.

All'interno del capitolo successivo saranno presentati i risultati derivanti dalle simulazioni effettuate su Phast rispetto ai risultati ottenuti attraverso il modello di calcolo implementato su Excel, accompagnati da opportune considerazioni.

5. Simulazioni, confronti e conclusioni

All'interno del precedente capitolo è stato introdotto il modello implementato su Excel unitamente al programma utilizzato per le simulazioni dei pool fire: Phast. Su Phast si fa riferimento a dei combustibili liquidi mentre il modello Excel utilizza dei solidi, ma, secondo quanto riportato sul Quintiere (Quintiere, 2016), le equazioni utilizzate per lo sviluppo del modello implementato su Excel sono valide anche per combustibili liquidi. Confrontando un combustibile liquido con uno in forma solida ci si aspetta di avere delle differenze in termini di temperatura, potenza emessa e durata della combustione; tuttavia, si è ritenuto interessante valutare cosa emerge dal confronto dei due modelli, Phast ed Excel, applicati alla medesima sostanza liquida, per capire se il Phast può essere utilizzato nella fase dello studio riguardante la dispersione dei fumi.

Dal momento che si sta simulando effettivamente un pool fire, nel caso di combustibili liquidi si dovrebbe arrivare agli stessi risultati con entrambi i metodi, o almeno a risultati simili e confrontabili. Da questo primo confronto si può quindi capire se i due modelli sono in linea ed escludere che l'eventuale differenziazione dei risultati successivi, ottenuti comparando il comportamento a combustione di una sostanza liquida con quello di un incendio in cumulo, sia dovuta semplicemente a un'incompatibilità dei due approcci, ma sia invece da ricercare nella differenza evidente tra le diverse tipologie di sostanze utilizzate per la simulazione.

5.1 Analisi dei risultati nei due modelli

La prima difficoltà incontrata è stata l'interpretazione dei risultati ottenuti su Phast, dovuta al fatto che l'output è differente rispetto a quanto emesso dal modello implementato su Excel; è stato perciò necessario correlare le grandezze in output al fine di poter ottenere un parametro comune di confronto.

Il modello "Incendio di cumulo" implementato su Excel fornisce in output la potenza totale emessa \dot{Q} , calcolata mediante l'equazione (4.1). Un secondo parametro di interesse è la potenza emessa per unità di superficie \dot{Q}/A , ottenuta dividendo il precedente risultato per la superficie di riferimento A [m²].

Dalle simulazioni su Phast, si ha in output la potenza radiante E_f , espressa in kW/m². La potenza radiante può essere espressa in funzione della potenza termica complessiva del fuoco, E_m [kW/m²], attraverso l'equazione 5.1:

$$E_f = E_m \left[1 - e^{-D/L_s} \right] \quad (5.1)$$

L_s è un parametro caratteristico che dipende dalla tipologia di combustibile considerato. Entrambi i parametri sono normalizzati rispetto alla superficie della fiamma, modellata come un cilindro. Nota E_m , la potenza totale emessa dal fuoco può essere espressa come (equazione 5.2):

$$\dot{Q} = \frac{E_m \times A}{\varepsilon} \quad (5.2)$$

Dove ε rappresenta l'emissività di fiamma, cioè il rapporto tra la potenza emessa dalla fiamma rispetto alla potenza totale prodotta durante la reazione di combustione, pari a 0.4.

5.2 Confronto tra i modelli Phast ed Excel

Innanzitutto, si è scelto di confrontare i due modelli utilizzando la stessa sostanza: il metanolo. La scelta deriva dal fatto che è una delle poche sostanze liquide presenti sul Phast, i cui dati sono reperibili anche all'interno del libro "Principles of fire behaviour", (Quintiere, 2016). Per avviare la simulazione, si è scelto un diametro D_{pool} pari a 0.5 m, corrispondente a un'area di 0.1963 m², per le condizioni meteorologiche si è scelto invece di utilizzare un set di parametri pre-impostati all'interno della sezione "Weather" del programma. I dati di input sono riassunti nella tabella seguente (tabella 5.1):

Tabella 5. 1 Dati iniziali inseriti all'interno di Phast. I dati meteorologici derivano da impostazioni già presenti sul programma; i dati relativi al pool fire sono arbitrari.

Dati iniziali			
Meteo		Dati pool fire	
<i>Categoria Pasquill</i>	D	<i>Sostanza</i>	Metanolo
<i>Vento [m/s]</i>	1,5	<i>Diametro D_{pool} [m]</i>	0,5
<i>Temperatura T_a K</i>	283	<i>Area base [m²]</i>	0,196

Avendo preso come primo tentativo un pool fire con un diametro di 0.5 m, è stato possibile applicare l'equazione (4.3) per il calcolo dell'altezza raggiunta dalle fiamme L_f seguendo la procedura esposta al paragrafo "Altezza delle fiamme" del capitolo 4 in quanto il parametro caratteristico Q^* risulta pari a 0.48 e quindi molto prossimo al limite inferiore di validità dell'equazione sopracitata (equazione 4.3). Q^* è una quantità adimensionale caratteristica di un fuoco con fiamma turbolenta, espressa dall'equazione (5.3).

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_a c_{pa} T_a \sqrt{g D} D^2} \quad 0.5 \leq Q^* \leq 100 \quad (5.3)$$

Dove:

- ρ_a è la densità dell'aria, pari a 1,2 [kg/m³];
- c_{pa} è il calore specifico dell'aria, pari a 1,0 [kJ/kgK];
- T_a è la temperatura dell'aria, generalmente presa pari a 293 K; in queste simulazioni è stata utilizzata l'impostazione base di Phast con T_a pari a 283 °C;
- \dot{Q} è la potenza termica del focolaio [kW];
- D è il diametro della pool [m];

- g è l'accelerazione di gravità, pari a 9,81 [m/s].

Di seguito, in tabella 5.2, si riportano i risultati ottenuti da entrambi i modelli:

Tabella 5. 2 Confronto tra i risultati ottenuti su Phast e quelli ricavati dall'applicazione delle equazioni prese dal libro "Principles of fire behaviour" (Quintiere, 2016) e implementate su Excel.

	Phast	Excel	Errore relativo %
$E_f [kW/m^2]$	14,79	13,97	5,53%
$E_m [kW/m^2]$	23,39	22,09	5,56%
Emissività fiamma ϵ	0,40	0,40	-
$\dot{Q} [kW]$	90,53	85,53	5,53%
$m'' [g/m^2s]$	2,87	4,32	50,35%
$\dot{Q}_{max}/A [kW/m^2]$	461,09	435,45	5,56%
$L_f [m]$	0,86	0,85	0,85%
$z/\dot{Q}^{2/5}$	0,00052	0,00058	11,15%
$T_{CL} - T_a [^\circ C]$	800	800	0%
$T_a [^\circ C]$	810	810	0%

5.2.1 Commento ai risultati

I valori ottenuti di \dot{Q} e del rapporto \dot{Q}/A sono confrontabili e differiscono di un errore relativo del 6%, calcolato rispetto al risultato ottenuto su Excel. L'errore può essere giustificato dall'ipotesi secondo cui si trascura l'inclinazione del cilindro rispetto all'asse verticale, poiché questa avrebbe ridotto l'area totale della fiamma e si sarebbe ottenuta una potenza totale inferiore e quindi più vicina al valore ottenuto con l'equazione (4.1) su Excel.

Per quanto riguarda i valori dell'altezza della fiamma L_f , questi differiscono di un errore relativo inferiore al 1%; i due approcci utilizzati sono quindi entrambi validi e i risultati forniti sono allineati.

Per il calcolo della temperatura della nube di fumo si fa riferimento alla procedura grafica riportata nel capitolo 4, all'interno della sezione dedicata. La temperatura è calcolata nel punto più alto posto sull'asse verticale passante per il centro del pool fire; perciò, si pone il parametro z pari a L_f e, utilizzando il valore di \dot{Q} , si ottengono i valori riportati in tabella 5.2.

5.2.2 Considerazioni sulla temperatura associate alla natura turbolenta del fenomeno

Il valore di temperatura raggiunto di 810 °C può sembrare relativamente “basso” rispetto a quanto ci si aspetterebbe; infatti, quando si pensa a un pool fire ci si immagina comunemente di avere temperature più elevate, al di sopra dei 1000 °C, ma i risultati sembrano in controtendenza con quanto detto e si è cercato di dare una spiegazione a questo risultato.

Se si considera la fiamma generata da un pool fire, essa è caratterizzata da tre movimenti di instabilità (Baki et al, 2003), riportati in ordine di rilevanza, al crescere del diametro del pool fire:

1. instabilità di Rayleigh-Taylor (R-T) a vita breve;
2. instabilità di Rayleigh-Taylor (R-T) estesa ;
3. puffing instability.

La puffing instability si manifesta attraverso oscillazioni quasi periodiche del fronte di diffusione di fiamma con formazione di vortici fiammeggianti su larga scala e di strutture a pennacchio dette “termiche”, caratterizzate da picchi di temperatura; tra le tre, è la più rilevante nel caso di un incendio di cumulo perché, per diametri elevati, prevale rispetto alle altre due. Quando si ha a che fare con fiamme che presentano un moto turbolento, l’alta frequenza del moto oscillatorio che le caratterizza, associata alla reazione di combustione, genera delle fluttuazioni di temperatura molto marcate che possono arrivare alle centinaia di gradi.

Quando si fa riferimento a grandezze come l’altezza della fiamma o la temperatura delle fiamme si tratta di grandezze medie; perciò, un dato valore di temperatura non è altro che una media in un intervallo di tempo durante il quale si susseguono dei pennacchi termici con forti oscillazioni, come si può osservare in figura 5.1.

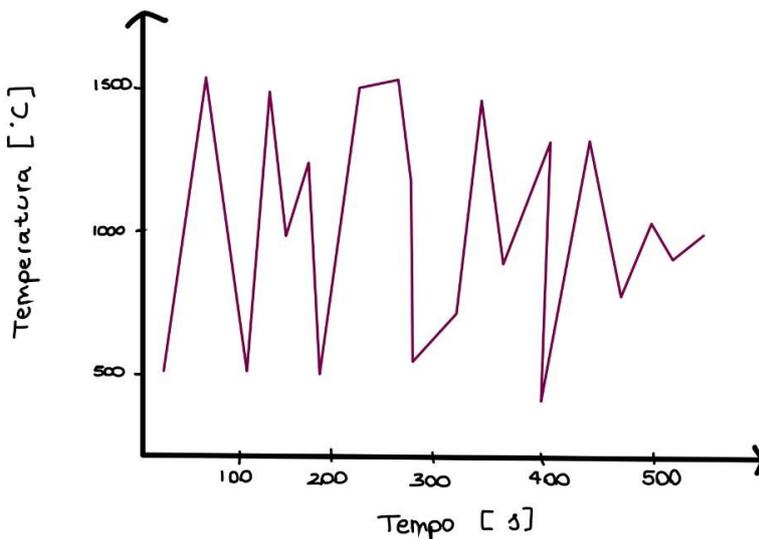


Figura 5. 1 Grafico approssimativo che mostra la temperatura puntuale della fiamma misurata nel tempo.

Quando si parla di instabilità della fiamme e di combustione di natura turbolenta si fa riferimento al caso generico in cui si ha un incendio; perciò, queste considerazioni sono valide sia nel caso in cui il combustibile sia liquido, sia nel caso in cui questo sia solido.

5.3 Considerazione sul calcolo dell'altezza delle fiamme

Come anticipato nel quarto capitolo, per ottenere il valore di temperatura è necessario conoscere l'altezza delle fiamme. In questo caso è stato possibile applicare l'equazione (4.3), ma per diametri maggiori essa non è valida e si è resa necessaria la ricerca di un approccio alternativo. Un aspetto aggiuntivo da prendere in considerazione riguarda la tipologia di combustibile considerato perché questo influenza fortemente la combustione e in particolare la produzione di fumi e fuliggine che "offuscano" la parte superiore della fiamma diminuendone la luminosità.

Pritchard e Binding (Pritchard et al, 1992) hanno tenuto in considerazione quest'aspetto utilizzando il rapporto (C/H) per descrivere il grado di saturazione del combustibile e quindi la sua tendenza a generare fuliggine; in aggiunta, hanno tenuto conto anche della velocità del vento e della velocità massica di combustione, formulando la seguente equazione (equazione 5.4):

$$\frac{L_c}{D} = 11.404(\dot{m}^*)^{1.13}(U_9^*)^{0.179}\left(\frac{C}{H}\right)^{-2.49} \quad (5.4)$$

Dove:

- \dot{m}^* è la velocità di combustione massica, espressa in forma adimensionale come (equazione 5.5):

$$\dot{m}^* = \frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \quad (5.5)$$

- U_9^* rappresenta la velocità del vento espressa in forma adimensionale misurata all'altezza di 9 metri; può essere calcolata mediante l'equazione (5.6)²¹:

$$U_9^* = \frac{U}{(g \dot{m}'' D / \rho_a)^{1/3}} \quad (5.6)$$

- L_c rappresenta l'altezza della parte più luminosa della fiamma, espressa in [m], che si trova nella parte al di sopra della superficie del combustibile e, di norma, è circa il 25% dell'altezza totale.

²¹ in realtà si fa riferimento al vento misurato all'altezza di 10 m e non a 9 m, in quanto è l'altezza classica a cui questo viene misurato anche nelle stazioni meteo

L'equazione (5.4) è già presente su Phast e viene adoperata dal software nel caso in cui si utilizzino delle tipologie di combustibili liquidi associati a “*smoky flames*”; cioè che, a differenza di quanto accade per il metanolo, producono fuliggine.

Questa correlazione (equazione (5.4)) non è l'unica alternativa presente in letteratura; all'interno del medesimo studio (Rew et al., 1997) viene infatti riportata anche la correlazione sviluppata da Ditali et al., riportata di seguito:

$$\frac{L_c}{D} = 12.4(\dot{m}'')^{0.61} D^{0.6} \left(\frac{C}{H}\right)^{-0.15} \quad (5.7)$$

Essa presenta diverse differenze rispetto a quella proposta da Pritchard e Binding: innanzitutto non considera l'influenza del vento (nei casi considerati in questo elaborato non è rilevante perché non ci sono condizioni di raffiche o di forte vento) e inoltre utilizza le grandezze misurate così come sono, senza riportarle in forma adimensionale. Un'ulteriore differenza riguarda il peso assunto dal parametro C/H all'interno dell'equazione, che è decisamente inferiore nel caso di Ditali et al. rispetto all'equazione sviluppata da Pritchard e Binding; si tratta di una considerazione importante in quanto i materiali che verranno presi in esame non sono formati esclusivamente da carbonio e idrogeno; infine, un'ultima differenza è che mentre nell'equazione (5.7) il diametro è esplicitato, nell'equazione (5.4) la sua influenza compare indirettamente all'interno delle grandezze adimensionalizzate ma non viene esplicitata nell'equazione vera e propria.

Si è scelto di utilizzare quest'ultima equazione sia perché ha una dipendenza inferiore dal rapporto C/H sia perché i parametri utilizzati al suo interno sono quelli direttamente misurati dalle stazioni meteorologiche e non necessitano di subire un ulteriore passaggio per essere riportati a valori adimensionali, come invece richiesto dall'approccio di Pritchard e Binding.

All'interno dello studio, viene riportato che entrambi i metodi sono validi per diametri superiori agli 1.5 m e sono stati sviluppati a partire da data set sperimentali che includevano pool-fire di idrocarburi di diversi metri di diametro; in aggiunta, dal momento che entrambe le equazioni utilizzano la velocità massica di combustione, è lecito pensare che possano essere utilizzate anche per la caratterizzazione di combustibili solidi, in quanto \dot{m}'' dipende dal calore di gassificazione L che, come esplicitato nel capitolo precedente, racchiude la differenza del processo di combustione tra solidi e liquidi.

5.4 Confronto tra combustibili di natura fisica differente: metanolo e polivinilcloruro

Come anticipato in precedenza, si è scelto di confrontare i due approcci iniziando col PVC perché si tratta di una plastica molto comune che si trova frequentemente all'interno dei rifiuti, la quale presenta un ΔH_C pari a 16.4 kJ/g, rispetto ai 19.8 kJ/g del metanolo; i due differiscono di uno scostamento relativo del 17% (rispetto al valore del PVC) e, tra le plastiche di cui si ha disponibilità dei dati, sono i più vicini in termini di ΔH_C .

All'interno del capitolo 4 si è discusso dell'importanza del fenomeno della pirolisi, e di come questo contraddistingua e influenzi la combustione di materiali solidi, come ad esempio il PVC; nello specifico è stato spiegato che il calore di pirolisi rallenta la combustione in quanto influenza la velocità di combustione. Per questo motivo, nella tabella seguente (tabella 5.3), si è deciso di riportare non solo il confronto con i ΔH_C , ma anche la differenza tra le velocità di

combustione associate ai due diversi combustibili, i rispettivi calori di gassificazione e il rapporto \dot{Q}/A .

Tabella 5. 3 Confronto dati metanolo e PVC. Per "Fattore" si intende il rapporto tra il valore associato al metanolo e il valore associato al PVC.

	ΔH_c [kJ/g]	L [kJ/g]	\dot{m}'' [g/m ² s]	\dot{Q}/A [kW/m ²]
Metanolo	19,80	1,23	22,00	307
PVC (granulare)	16,40	1,7 - 2,5	16,00	1126
Fattore (PVC/met.)	0,83	1,71 ²²	0,73	3,67

Il polivinilcloruro (PVC) è un polimero termoplastico ottenuto dalla polimerizzazione del cloruro di vinile $(-CH_2CHCl-)_n$ e contribuisce alla domanda europea di plastica totale per il 12% (dati in riferimento al 2012 (H Yang, H Chen, 2014)), rappresentando quindi una delle tipologie di plastiche maggiormente utilizzate; di conseguenza, è anche una tipologia di plastica molto comune all'interno dei rifiuti. Confrontando i valori dei rispettivi calori di gassificazione, la prima differenza che si osserva è che il metanolo, essendo liquido, presenta un unico valore, preciso, mentre per quanto concerne il PVC viene fornito un intervallo di possibili L [kJ/g] in quanto per i combustibili solidi il calore di gassificazione non è una proprietà del materiale con un valore definito, ma è una proprietà media approssimativa che può variare nel tempo, perché il char trattiene parte dell'energia (come spiegato all'interno del capitolo 6 del Quintiere, 2016, paragrafo *Heat of Gasification, L kJ/g*).

Per quanto riguarda l'impostazione delle condizioni meteo, si sono considerati i tre incendi occorsi, Incendio 1, Incendio 2 e Incendio 3, presentati all'interno del capitolo 3; in relazione alla scelta della temperatura, si è adottata la temperatura massima nel caso dell'Incendio 1, perché è avvenuto nel mese di agosto e in pieno giorno, mentre negli altri due casi si è fatto riferimento alla temperatura atmosferica media. Le classi atmosferiche sono state scelte sulla base delle indicazioni riportate su Phast e all'interno del quarto capitolo; tutti i dati meteorologici sono riportati in tabella 5.4.

Tabella 5. 4 Dati meteorologici in riferimento ai tre casi di incendi occorsi descritti nelle relazioni tecniche fornite da Arpa Piemonte (Arpa, s.d.).

Incendio	1	2	3
Data	14-ago-21	29-ott-21	12-ago-19

²² Per il calcolo del fattore di rapporto, in relazione al valore di L del PVC è stato utilizzato un valore medio tra i due estremi del range riportato in tabelle 4.3

Materiale	Rifiuti ingombranti, plastiche, stoffe, materiale misto triturato	Rifiuti ingombranti, plastiche, stoffe, materiale misto triturato	Cumulo di materiali in plastica e carta
T media [°C]	28	6	23
T max [°C]	33	11	28
Umidità media	0,58	0,7	0,87
Velocità vento [m/s]	1,94	1,11	2,22
Altre indicazioni	Pieno giorno, soleggiato	Notte	Pioggia, temporale
Classe di stabilità	A	F	C/D

In tabella 5.5 si riportano i valori ottenuti utilizzando le condizioni meteorologiche relative al caso “Incendio 1”. Per questo primo confronto si sono scelti 8 valori differenti di area di cumulo, in modo da poter osservare come cambiano i risultati al crescere del diametro dell’incendio di cumulo e se ci sono dei parametri che invece si mantengono costanti indipendentemente dalle dimensioni dell’incendio.

Tabella 5. 5 Confronto risultati tra Phast (metanolo) ed Excel (PVC) con i dati meteorologici dell’Incendio 1.

D [m]	Metanolo				PVC			
	α [°]	L_f [m]	L_f/D	\dot{Q} [kW]	\dot{Q} [kW]	L_c/D	L_c [m]	L_f [m]
7,98	35,10	6,42	0,805	1,53E+04	1,31E+04	0,304	2,42	9,71
11,28	32,78	8,16	0,724	3,07E+04	2,62E+04	0,247	2,79	11,15
17,84	29,85	11,23	0,629	7,69E+04	6,56E+04	0,188	3,35	13,40
35,68	25,57	18,18	0,509	3,07E+05	2,62E+05	0,124	4,42	17,68
79,79	20,97	31,80	0,399	1,53E+06	1,31E+06	0,076	6,10	24,39
112,84	19,14	40,46	0,359	3,07E+06	2,62E+06	0,062	7,00	28,01
178,41	16,90	55,63	0,312	7,67E+06	6,56E+06	0,047	8,41	33,65
225,68	15,82	65,50	0,29	1,23E+07	1,05E+07	0,041	9,24	36,97

Confrontando i risultati ottenuti, sono emerse le seguenti considerazioni:

- i. i valori della potenza emessa, a parità di diametro, hanno lo stesso ordine di grandezza e, calcolando l'errore relativo tra le potenze emesse rispetto al valore ottenuto per il PVC esso risulta pari al 17% indipendentemente dalla dimensione scelta, ovvero il medesimo valore di errore relativo ottenuto per i ΔH_C ;
- ii. si sono calcolati i rapporti \dot{Q}/A , che son costanti e pari a 262,4 [kW/m²] per il PVC e a 306,97 [kW/m²] per il metanolo; essendo costanti, anche il loro rapporto è costante e pari a 0,86, come mostrato in figura 5.2;
- iii. l'altezza delle fiamme non risulta in alcun modo correlabile nei due casi, probabilmente perché essa dipende dal rapporto C/H che è molto differente nel caso del metanolo (0.25) e del PVC (0.67).

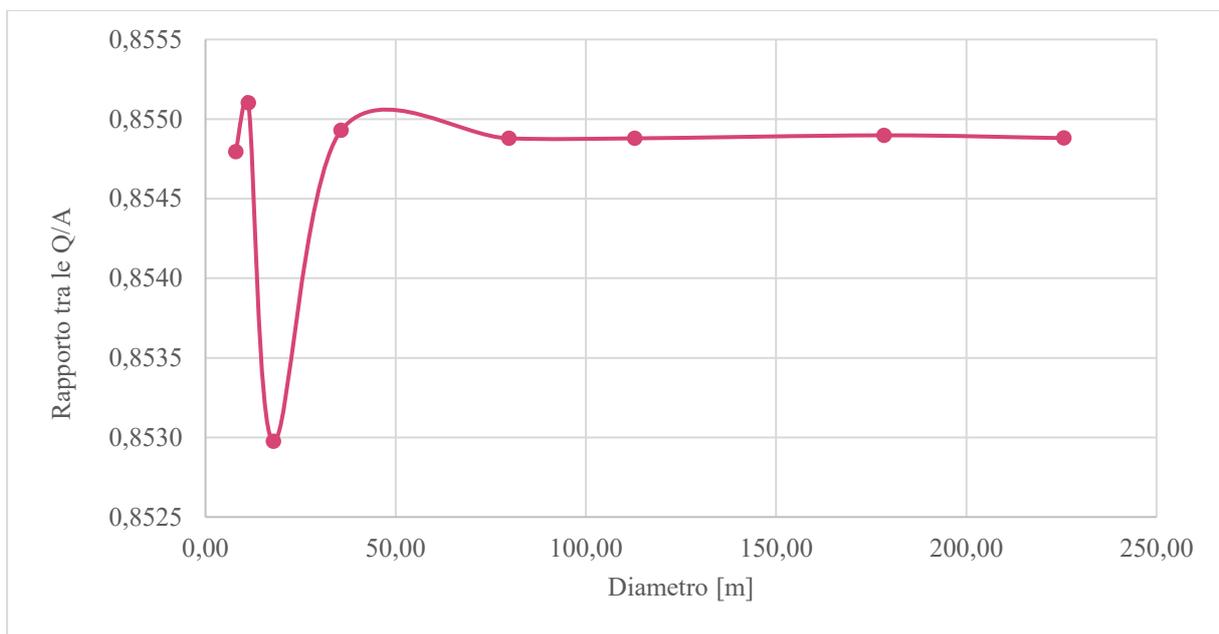


Figura 5. 2 Rapporto tra i valori \dot{Q}/A per metanolo (modello Phast) e PVC (modello Excel).

Di seguito, vengono riportanti in figura 5.3 e 5.4 gli andamenti dell'altezza delle fiamme e del rapporto tra questa e il diametro rispettivamente del cumulo nel caso di combustibile solido e del pool fire nel caso del metanolo.

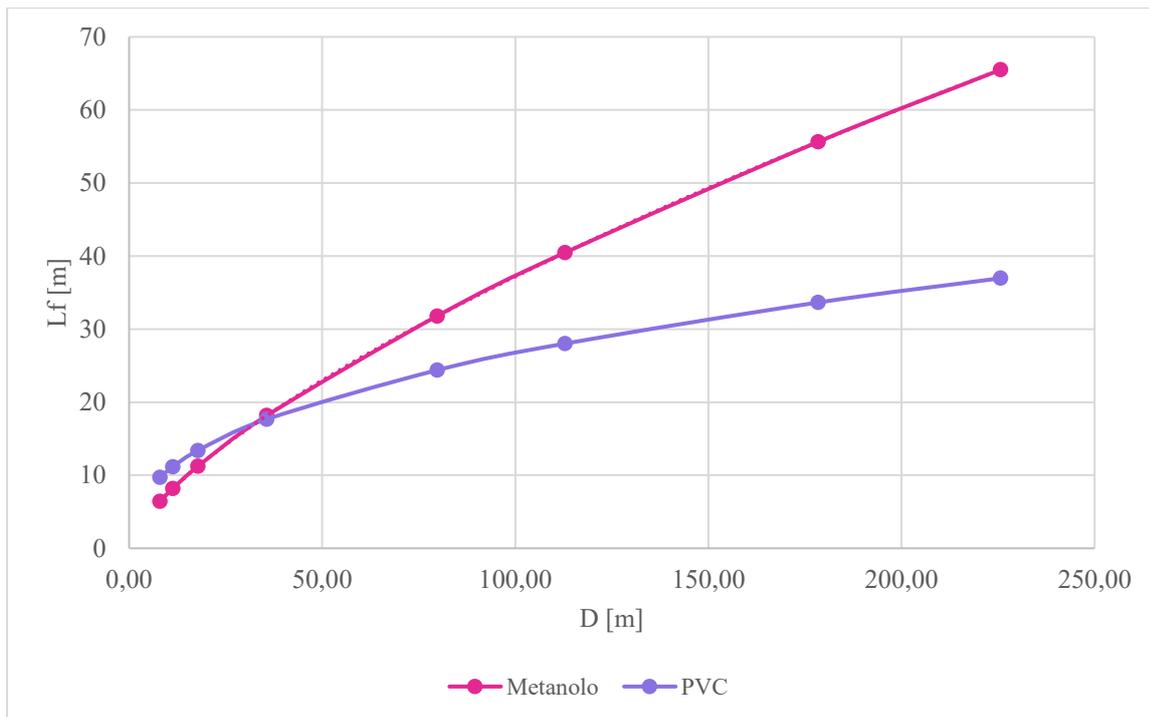


Figura 5.3 Altezza delle fiamme in funzione del diametro.

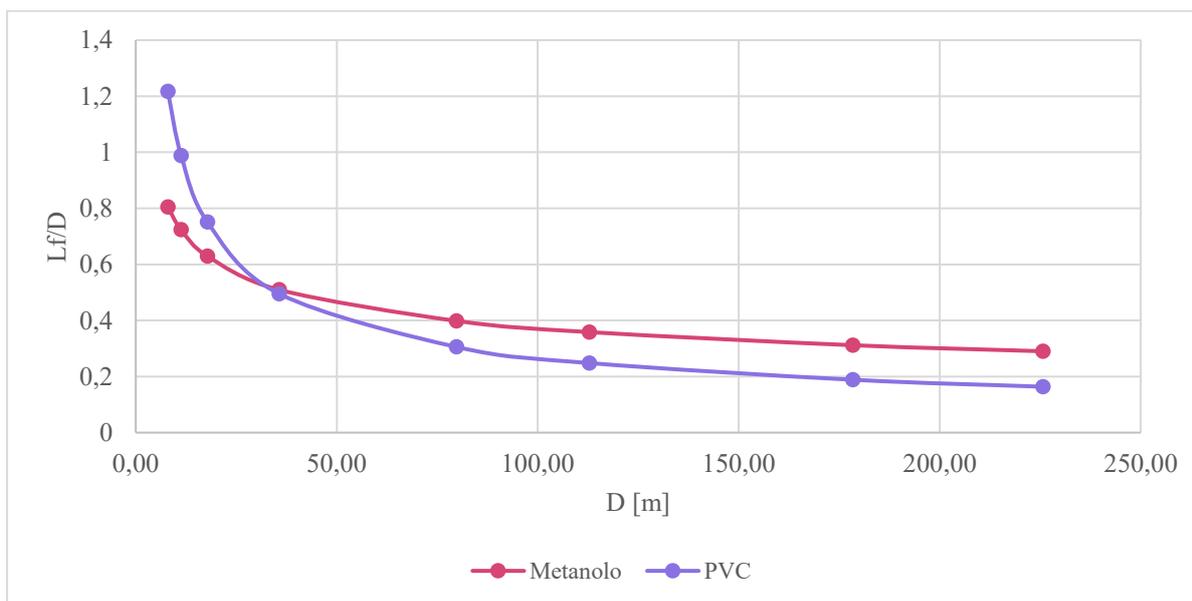


Figura 5.4 Variazione del rapporto L_f/D al crescere del diametro dell'incendio di cumulo.

In entrambi i grafici è evidente che per valori di diametro fino ai 30 m circa il PVC mostra un'altezza delle fiamme maggiore mentre, al di sopra di questo valore prevale l'altezza delle fiamme sviluppate dal metanolo.

Osservando l'equazione (5.7), la differenza nell'altezza delle fiamme (a parità di condizioni meteorologiche) può essere giustificata da una velocità massica differente e dal diverso rapporto C/H dei due combustibili. Inoltre, entrambi contengono eteroatomi; perciò, l'equazione (5.7),

potrebbe non essere pienamente adatta alla descrizione dell'altezza della fiamma sviluppata dalla sua combustione.

Dai grafici relativi all'altezza delle fiamme riportati in figura 5.3 e 5.4 risulta evidente che non esiste una correlazione tra i due casi e, se si effettua il rapporto tra le altezze ottenute nel caso di metanolo e PVC, non sussiste alcuna proporzionalità in quanto il fattore di rapporto $L_{f\text{ PVC}} / L_{f\text{ METH}}$ cambia al variare del diametro, al contrario di quanto osservato per le potenze emesse per unità di superficie.

A valle di queste considerazioni, si è scelto di effettuare delle simulazioni cambiando le condizioni meteo e prendendo in esame anche quelle relative al secondo e al terzo caso di incendi occorsi presentati all'interno del Capitolo 3, riportati di seguito in tabella 5.6.

Tabella 5. 6 Confronto dei rapporti tra \dot{Q}/A ottenuti su Phast (metanolo) e su Excel (PVC) nei tre casi corrispondenti a condizioni meteo differenti. (E/P) indica che è stato effettuato il rapporto tra il valore fornito su Excel e quello fornito su Phast.

	Incendio 1	Incendio 2	Incendio 3
Rapporto tra \dot{Q}/A (E/P)	0,855	0,855	0,855
Velocità vento u [m/s]	1,94	1,11	2,22
Temperatura [°C]	33	6	23

Il variare delle condizioni meteo non ha un'influenza rilevante nei risultati, probabilmente perché la velocità del vento non assume valori elevati e non si hanno condizioni di meteo estreme tali da influenzare significativamente il fenomeno; questo comportamento potrebbe variare nel caso di raffiche molto forti le quali potrebbero inclinare significativamente la fiamma e perciò ridurre l'altezza sviluppata in direzione verticale.

5.5 Simulazioni con diverse tipologie di materiali

Il modello "Incendio di cumulo" implementato su Microsoft Excel (2022) è stato poi applicato ai seguenti materiali: polietilene, polipropilene, PVC (già confrontato col metanolo), polistirene e legno. Prima di presentare i risultati si è scelto di fornire qualche informazione aggiuntiva riguardante tali materiali.

Il polietilene (di seguito PE) è il più semplice dei polimeri sintetici e ha formula chimica $(-C_2H_4-)_n$; è la materia plastica più comune e si presenta come un solido trasparente (forma amorfa) e bianco (forma cristallina); è un materiale molto versatile ed economico, può essere utilizzato come materiale isolante, per la produzione di film polimerici, buste di vario tipo, contenitori, o all'interno di strutture composite.

Il polipropilene (di seguito PP) è un polimero che presenta proprietà simili al PE, con formula chimica $(-C_3H_6-)_n$; i due hanno il medesimo calore effettivo di combustione, pari a 43.3 kJ/g, ma possono presentare delle differenze nel valore del calore di gassificazione L .

Il polistirene (di seguito PS) è un polimero aromatico termoplastico con struttura lineare, si presenta come un solido vetroso e inizia a decomporsi alla temperatura di 270°C; ha formula bruta $(-C_8H_8-)_n$ e viene utilizzato in molti settori come, ad esempio, l'industria alimentare o manifatturiera, per la produzione di "vetro sintetico" o per produrre componenti o oggetti di vario genere.

PE, PP, PS e PVC son tutti polimeri termoplastici; il legno è un materiale differente che non appartiene alla classe dei polimeri. È costituito da circa il 50% di carbonio, 44% di ossigeno e dal 6% circa di idrogeno; si tratta di un materiale di origine vegetale (a differenza dei polimeri sopracitati) formato da cellulosa, emicellulosa e lignina in percentuale variabile che ne determinano le diverse tipologie con proprietà fisiche, chimiche e meccaniche differenti. Sottoposto all'azione del calore, il legno si decompone per pirolisi in gas volatili, vapore acqueo e altri prodotti di combustione come anidride carbonica, monossido di carbonio e fumi che trascinano anche ceneri residue dalla combustione.

Rispetto ai materiale di origine plastica, il legno presenta una minore tendenza a prendere fuoco e ha bisogno di un'esposizione alla fiamma più duratura (basti pensare alla facilità con cui prende fuoco una busta di plastica rispetto a un piccolo oggetto di legno); in aggiunta, una volta che la combustione si è avviata essa genera una carbonizzazione dello strato esposto alle fiamme che si comporta da isolante separando la reazione di combustione dallo strato più interno di materiale che si mantiene isolato termicamente. La combustione del legno, e quindi dei rifiuti da esso composti come sedie, culle, tavoli, mobili di vario tipo, è influenzata da fattori quali:

- la porosità; più il materiale è poroso, più rapidamente avverrà l'ingresso dell'ossigeno e il rilascio dei gas di pirolisi e quindi più sarà accelerata la reazione di combustione;
- la superficie e la forma dell'oggetto considerato; più questa è liscia e regolare e minore sarà la capacità di penetrazione delle fiamme;
- la presenza di umidità; l'acqua si oppone al propagarsi delle fiamme perché per la sua evaporazione è richiesta molta energia e la combustione ne risulta rallentata.

5.5.1 *Commento ai risultati*

Di seguito, in tabella 5.7, si riportano i valori di \dot{Q} espressi in [kW] ottenuti applicando il modello alle tipologie di materiali citati precedentemente, con riferimento alle condizioni meteo associate al caso "Incendio 1" (tabella 5.7).

Tabella 5. 7 Confronto della potenza massima ottenuta Phast (metanolo) con quella ricavata dal modello Excel applicato PE, PS e legno.

D [m]	PE	PP	PVC	PS	Legno
7,98	5,63E+04	5,20E+04	1,31E+04	7,56E+04	7,70E+03
11,28	1,13E+05	1,04E+05	2,62E+04	1,51E+05	1,54E+04
17,84	2,81E+05	2,60E+05	6,56E+04	3,78E+05	3,85E+04
35,68	1,13E+06	1,04E+06	2,62E+05	1,51E+06	1,54E+05
79,79	5,63E+06	5,20E+06	1,31E+06	7,56E+06	7,70E+05

112,84	1,13E+07	1,04E+07	2,62E+06	1,51E+07	1,54E+06
178,41	2,81E+07	2,60E+07	6,56E+06	3,78E+07	3,85E+06
225,68	4,50E+07	4,16E+07	1,05E+07	6,05E+07	6,16E+06

Gli ordini di grandezza si mantengono costanti in tutte le tipologie di plastica analizzate mentre, per quanto concerne il legno, esso mostra valori di potenza emessa di un'ordine di grandezza inferiore. In tabella 5.8 sono invece riportate le grandezze caratteristiche dei materiali selezionati unitamente al loro rapporto rispetto alla grandezza corrispondente del metanolo. In aggiunta, sono presenti i valori del fattore di rapporto delle \dot{Q}/A dei diversi materiali sempre rispetto al valore del metanolo, al fine di comprendere se la proporzionalità osservata durante il confronto tra metanolo e PVC fosse un caso isolato o ricorrente. Al fondo della tabella, si riportano i rapporti C/H dei diversi materiali considerati, utili per il calcolo dell'altezza delle fiamme.

Tabella 5. 8 Proprietà e fattori di rapporto per i diversi materiali adoperati nelle simulazioni

Materiali:	Metanolo	PE	PP	PS	PVC	Legno
<i>ΔH_c [kJ/g]</i>	19,80	43,30	43,30	39,80	16,4	13 - 15
<i>\dot{m}'' [g/m²s]</i>	22,00	26,00	24,00	38,00	16	11,00
<i>L [kJ/g]</i>	1,23	1,8 - 3,6	2,0 - 3,1	1,3 - 1,9	1,7 - 2,5	4 - 6,5
<i>Rapporto ΔH_c (materiale/ metanolo)</i>	-	2,19	2,19	2,01	0,83	0,71
<i>Rapporto \dot{m}'' (materiale/ metanolo)</i>	-	1,18	1,09	1,73	0,73	0,50
<i>Rapporto L (materiale/ metanolo)</i>	-	2,20	2,07	1,30	1,71	4,27
<i>Rapporto tra le \dot{Q} (materiale/ metanolo)</i>	-	3,67	3,39	4,93	0,86	0,50
<i>Rapporto C/H</i>	0,25	0,5	0,5	1	1	8,33
<i>\dot{Q}/A [kW/m²]</i>	307	1126	1039	1512	262	154

\dot{Q}/A (materiale /metanolo)	-	3,67	3,38	4,93	0,85	0,50
-----------------------------------	---	------	------	------	------	------

Confrontando la IV con l'ultima riga della tabella non sembra esserci tuttavia alcuna ripetitività nel rapporto tra le ΔH_C e le Q_{max}/A e anzi i valori sembrano totalmente slegati; perciò, si può affermare che quanto osservato col PVC fosse un caso isolato senza alcun fondamento matematico.

In figura 5.5 si riporta un istogramma che rappresenta il rapporto L_c/D ottenuto utilizzando l'equazione (5.7) di Ditali et al. riportata all'interno dello studio di Rew et al. (Rew et al., 1997).

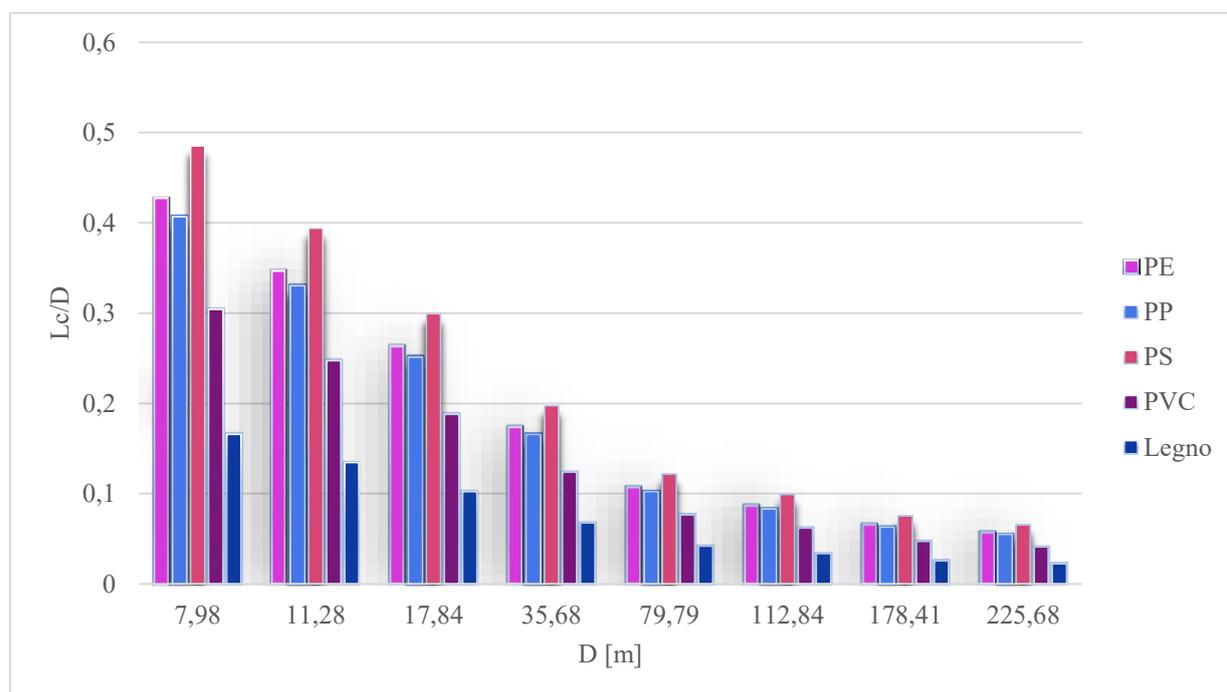


Figura 5.5 Istogramma rapporto L_c/D in funzione del diametro.

L'istogramma mostra che il rapporto L_c/D tende a diminuire al crescere del diametro e non sembra mostrare alcuna proporzionalità diretta col rapporto C/H (com'era prevedibile dall'equazione (5.7)). Si nota inoltre una differenza marcata tra quanto ricavato per PE, PP e PS, formate solo da carbonio e idrogeno, e quanto ottenuto per il legno e per il PVC, che invece contengono una percentuale importante di eteroatomi (ossigeno e cloro rispettivamente).

È stato puntualizzato che L_c fa riferimento alla zona più luminosa della fiamma che sovrasta la superficie di combustibile e, secondo quanto riportato all'interno della guida di Phast^[53], l'altezza della parte luminosa corrisponde a meno del 25% dell'altezza totale della fiamma. Noto questo, si è scelto di riportare nel seguente istogramma in figura 5.6 sia l'altezza della zona luminosa L_c , sia l'altezza totale della fiamma L_f in riferimento a un diametro a scelta tra quelli considerati e pari a 17,84 [m].

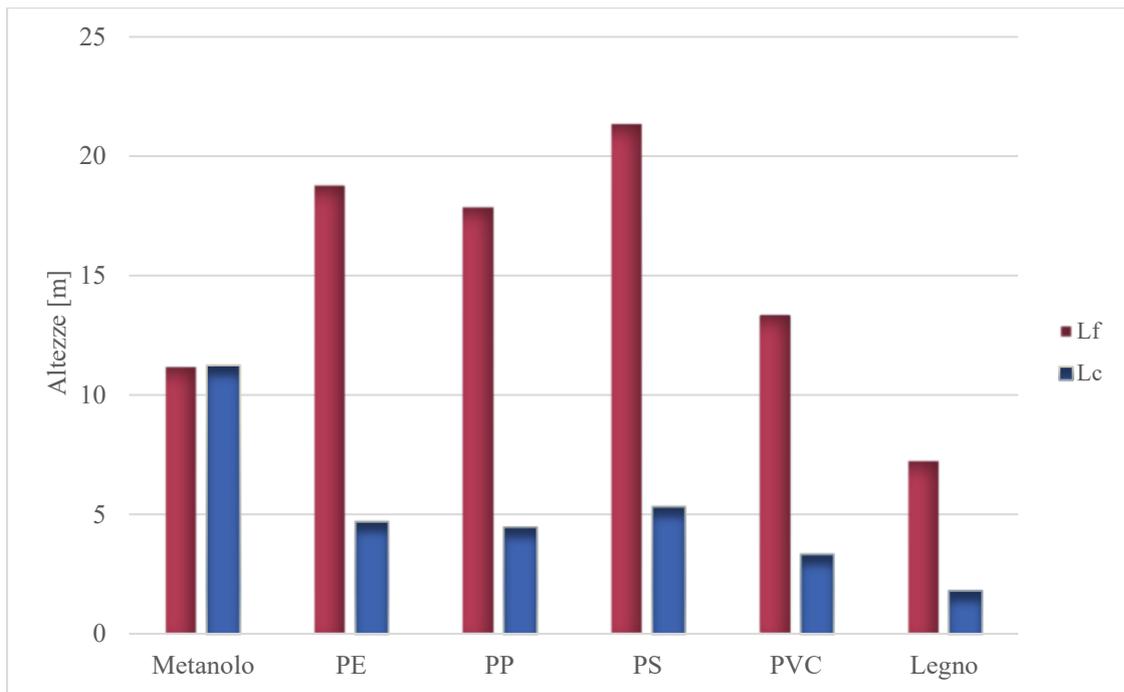


Figura 5.6 L_c e L_f per le 6 tipologie di materiale scelto con un diametro di cumulo pari a 17.8 m.

Il metanolo non presenta differenze tra le due altezze perché non produce fuliggine e quindi non è presente una distinzione tra una zona più luminosa e una più oscurata al di sopra di essa.

In figura 5.7 si è scelto di riportare l'altezza delle fiamme L_f in funzione del diametro, includendo anche il dato sul metanolo ottenuto da Phast.

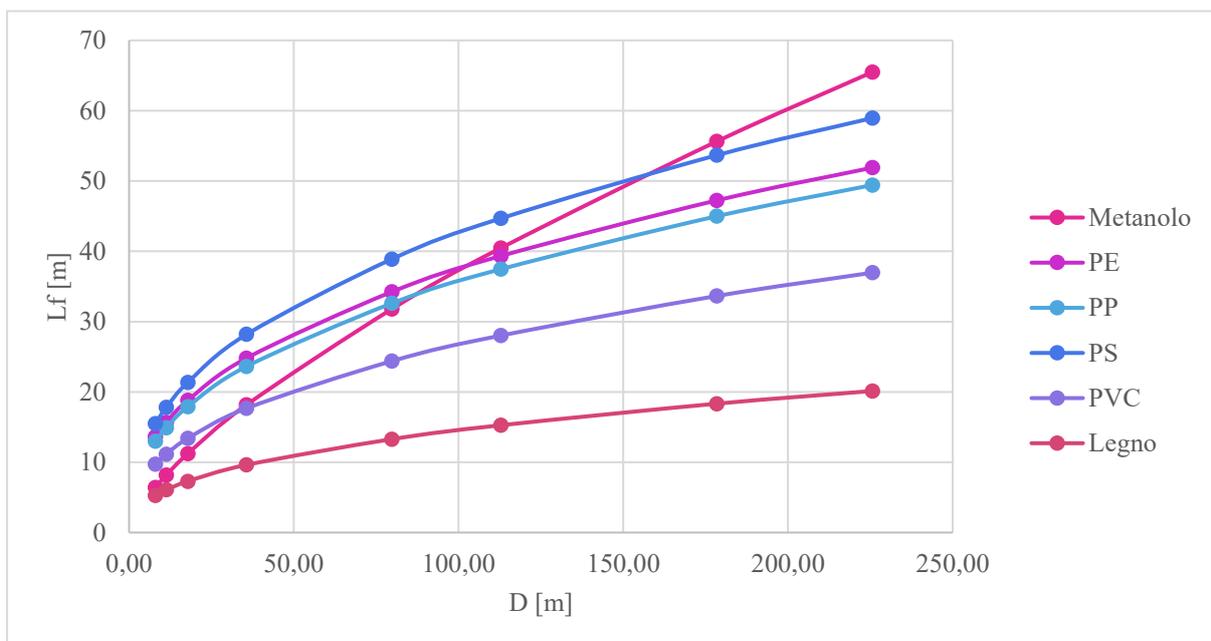


Figura 5.7 Altezza fiamme in funzione del diametro per PE, PS, PVC e Legno. I dati su PS e PVC sono molto vicini e di conseguenza non è possibile apprezzarne la differenza graficamente (per le proprietà si rimanda alla tabella 5.8)

In aggiunta, sono state ricavate le funzioni che descrivono l'andamento dei dati ricavati dal modello; si è scelto di interpolare i dati con delle funzioni di secondo grado utilizzando il comando “*linea di tendenza, polinomiale, grado 2*” su Excel. Le equazioni sono le seguenti:

- Metanolo:

$$y = -0.0005 x^2 + 0.3784 x + 4.2754 \quad (5.8)$$

- PE:

$$y = -0.0006 x^2 + 0.3124 x + 12.722 \quad (5.9)$$

- PP:

$$y = -0.0006 x^2 + 0.2975 x + 12.116 \quad (5.10)$$

- PS:

$$y = -0.0007 x^2 + 0.3548 x + 14.452 \quad (5.11)$$

- PVC:

$$y = -0.0004 x^2 + 0.2225 x + 9.0614 \quad (5.12)$$

- Legno:

$$y = -0.0002 x^2 + 0.1212 x + 4.9362 \quad (5.13)$$

L'altezza delle fiamme per ciascun materiale considerato viene rappresentata in modo molto fedele dalle equazioni riportate e questo può essere dedotto osservando il valore di R-squared, un fattore che può variare tra 0 e 1 e che descrive la relazione tra il fenomeno analizzato e la sua equazione di regressione; più è prossimo a 1 e maggiore è l'accuratezza dell'equazione che interpola i dati sperimentali. Nei casi considerati, il valore di R-squared varia tra 0.994 e 1, testimoniando l'accuratezza dell'approssimazione.

Considerando l'espressione generica dell'equazione come $y = a x^2 + b x + c$, si nota che tutti i coefficienti “*a*” hanno lo stesso ordine di grandezza tra loro, così come i coefficienti “*b*”. I materiali solidi mostrano tutti lo stesso andamento, probabilmente perché ad essi è stata applicata la procedura di Ditali et al. ^[43] mentre, per quanto riguarda il metanolo, si sono utilizzati i valori derivanti dalle simulazioni Phast.

5.5.2 Considerazioni sul calcolo della temperatura

Seguendo la procedura grafica esposta all'interno del capitolo precedente per il calcolo della temperatura, viene richiesto il calcolo del fattore $z/\dot{Q}^{2/5}$; quando questo è inferiore a 0.06 il diagramma sottostante riportato in figura 5.8 mostra un ΔT costante e pari a circa 800 °C.

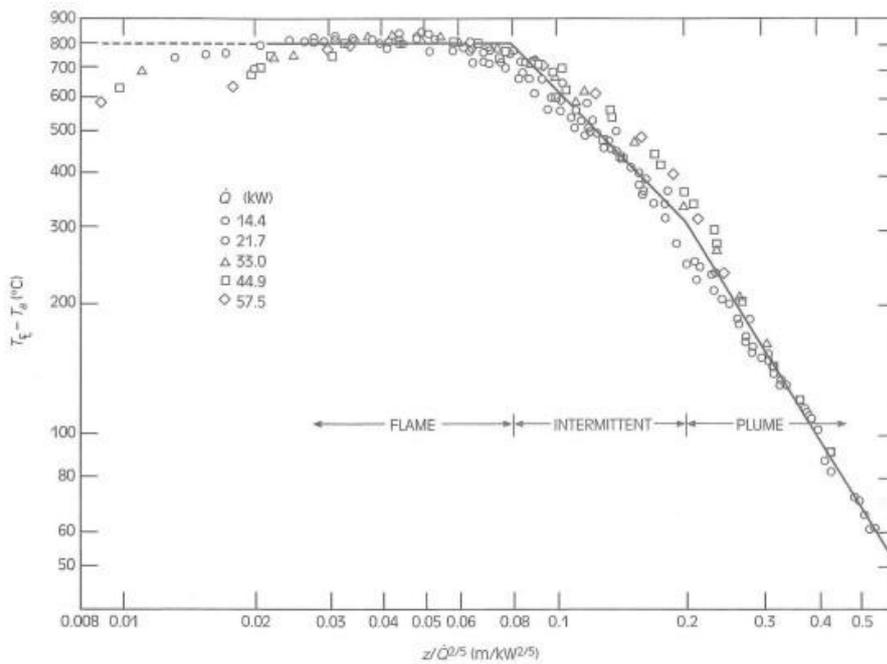


Figura 5. 8 Procedura grafica per il calcolo della temperatura (Quintiere, 2016).

Come detto in precedenza, il valore di temperatura ottenuto è un valore medio e, nei casi analizzati, si ottiene un ΔT che non dipende dal combustibile considerato in quanto si è osservato che tutti i fattori $z/\dot{Q}^{2/5}$ risultano inferiori a 0.06, come si può osservare dalla tabella (tabella 5.9) sottostante, nella quale si riportano i valori di $z/\dot{Q}^{2/5}$ per i diversi materiali in riferimento al caso con diametro pari a 7.98 [m].

Tabella 5. 9 Calcolo del parametro $z/\dot{Q}^{2/5}$ nei diversi casi.

	Metanolo	PE	PP	PS	PVC	Legno
$L_f/\dot{Q}^{2/5}$ [m/kW ^{2/5}]	1,4 E-07	4,82 E-23	6,86 E-23	1,35 E-08	1,1 E -08	4,46 E-07

Rispetto al valore di riferimento, pari a 0.06, i valori ricavati nei casi riportati in tabella 5.9 si discostano di diversi ordini di grandezza, variando da 10^{-7} a 10^{-23} [m/kW^{2/5}]; tuttavia, considerato l'andamento asintotico del grafico considerato in figura 5.8, si è comunque considerata valida questa procedura per il calcolo approssimativo del ΔT , anche se si ritiene

opportuno precisare che bisognerebbe effettuare degli studi ad hoc e delle misurazioni sul campo al fine di comprovare questi risultati empirici.

Le procedure di intervento di Arpa Piemonte seguite nel caso di incendi di cumulo all'interno di stabilimenti di rifiuti non prevedono al momento di rilevare la temperatura delle fiamme durante l'incendio e perciò non si hanno dati che possano smentire o confermare l'ipotesi precedente. In letteratura non si è trovato alcun riscontro che menzionasse il calcolo della temperatura per cumuli di materiali solidi di dimensioni confrontabili con quelle che caratterizzano i casi di incendi considerati, tantomeno informazioni sulla temperatura sviluppata in incendi di rifiuti. Non si esclude che in futuro si possa costituire una banca dati con tali informazioni, che potrebbero essere raccolte durante l'evento e utilizzate per raffinare il modello di seguito presentato.

5.6 Proposta di un modello sorgente alternativo da implementarsi sul software Phast: "Incendio di cumulo"

Dopo aver esaminato i confronti con gli altri materiali, si è scelto di concludere questo elaborato proponendo un modello semplice e funzionale che potrebbe facilmente essere implementato in Phast per la modellazione del termine sorgente. Si è scelto di chiamarlo "Incendio di cumulo" e si tratta di un modello non incentrato sul calcolo delle conseguenze che potrebbe conferire al software un valore aggiunto, e, inoltre, non si esclude la possibilità di poter successivamente integrare il modello "Incendio di cumulo" con ulteriori estensioni che potrebbero prevedere, ad esempio, la stima della portata e composizione dei fumi e successivamente la stima della dispersione dei fumi prodotti dalla combustione.

Il modello che viene proposto si basa sulle equazioni utilizzate all'interno dei fogli di calcolo Excel e si è scelto di presentarlo seguendo l'impostazione già presente su Phast; può essere applicato a un materiale alla volta. In base ai dati reperiti sul Quintiere (Quintiere, 2016), la disponibilità dei materiali tra cui scegliere non è molto ampia e comprende diversi tipi di plastiche e il legno; tuttavia, nel caso in cui il modello venisse incluso nel pacchetto Phast, sarebbe opportuno mettere a disposizione dell'utente un numero maggiore di classi di materiali, con le relative proprietà. Prima di procedere, si è scelto di precisare quali sono i dati utili da inserire all'interno del database del programma per l'utilizzo del modello "Incendio di cumulo".

5.6.1 Database

All'interno della sezione "Materials" che contiene le varie tipologie di sostanze (liquide e gassose) potrebbe essere aggiunta una sottosezione per i rifiuti da affiancare a quelle già presenti, ovvero "mixture", "substance" e "warehouse material". La sottosezione dovrebbe comprendere materiali diversi come plastiche di diverso tipo, carta, cartone, legno, ma anche oggetti che spesso popolano gli impianti che gestiscono rifiuti, come oggetti per arredamento, mobili, materassi e ingombranti. Un'altra tipologia di rifiuti interessante da inserire potrebbero essere le stoffe, che possono essere formate da materiali di natura sintetica (alcuni di origine plastica) o con origini naturali, come il cotone o la seta.

Il database dovrebbe includere, per ciascuna tipologia di materiale, informazioni su:

- velocità massica media di combustione per unità di superficie \dot{m}'' [g/m²s];
- calore effettivo di combustione ΔH_C [kJ/g];
- calore di gassificazione L [kJ/g];

- emissività associata alla fiamma sviluppata dal materiale ϵ ;
- la massima potenza termica specifica \dot{Q}/A [kW/m²].

Inoltre, sarebbe importante fare una distinzione basata sulla forma fisica del materiale considerato, quindi distinguere, ad esempio, tra rifiuti tritati o meno. Ad esempio, osservando la tabella 6.5 riportata a pag. 122 del capitolo 6 del Quintiere (Quintiere, 2016), si nota che la potenza termica specifica varia a seconda della configurazione che il materiale ha. Ad esempio, nel caso di pellets stoccati, la potenza termica specifica aumenta all'aumentare dell'altezza del cumulo; oppure, considerando oggetti in PE come bottiglie, cassette per le lettere o cestini per l'immondizia, si nota che tutti hanno un valore di potenza termica specifica differente, che varia tra gli 1,9 e gli 8,2 MW/m²; la forma fisica è quindi rilevante e andrebbe considerata, anche se in questo elaborato non sono stati condotti degli studi approfonditi a riguardo.

5.6.2 *Dati di input*

I dati di input vengono suddivisi in:

- Ambient data:

l'impostazione dei dati riguardanti le condizioni atmosferiche segue quanto descritto all'interno del paragrafo "Ambient data" del terzo capitolo.

- Heap fire data (incendio di cumulo):

l'impostazione dei dati relativi all'incendio di cumulo richiede la conoscenza dell'area in pianta o in alternativa del diametro equivalente del cumulo, e la scelta di uno tra i materiali a disposizione nel database.

- Material properties:

le proprietà del materiale sono presenti all'interno del database e sono a disposizione dell'utente, anche se, trattandosi di rifiuti, sarebbe appropriato lasciare la possibilità di inserire dati personalizzati.

5.6.3 *Dati di output*

Potenza emessa

La potenza emessa \dot{Q} viene calcolata utilizzando l'equazione (4.1) del Capitolo 4, utilizzando le informazioni sulla velocità massica di combustione \dot{m}'' e sul calore effettivo di combustione ΔH_C presenti nel database. Nel modello utilizzato su Excel si fa riferimento alla potenza massima emessa perché i dati relativi alla velocità di combustione facevano riferimento al suo valore massimo; poiché di norma si è interessati al caso peggiore e poiché un incendio di cumulo può raggiungere e mantenere a lungo lo stato stazionario (che sostanzialmente corrisponde col caso più critico), è corretto utilizzare anche nel database i valori di potenza massima sviluppata. Per completezza, questo dato viene accompagnato dal calcolo della potenza termica specifica \dot{Q}/A [kW/m²], che in genere è il parametro di riferimento per gli incendi.

Altezza fiamme

Al contrario di quanto accade per la potenza emessa, il calcolo dell'altezza delle fiamme non può seguire un'unica procedura che prescinde dalla tipologia di materiale considerato, ma risulta più complesso. L'equazione (5.7) in riferimento al calcolo di L_c non può essere utilizzata per qualsiasi tipologia di materiale ma solamente per i combustibili di natura idrocarburica (Rew et al., 1997). Per quanto concerne le plastiche che non contengono atomi che non siano carbonio e idrogeno, come PE e PP, l'equazione viene considerata affidabile perché il rapporto C/H è rappresentativo per il combustibile in esame; per gli altri materiali invece sarebbe opportuno l'utilizzo di equazioni specifiche sviluppate appositamente per quella categoria di solido. D'altra parte, poiché la fiamma non è un solido statico ma fluttua e cambia posizione in continuazione, è stata assunta valida l'equazione (5.7) anche per plastiche complesse e per il legno, ricordando comunque che si tratta di un valore approssimativo.

Temperatura

Secondo quanto mostrato nel grafico in figura 5.8, al di sopra di determinate dimensioni la temperatura media è circa costante e si aggira attorno agli 800 °C.

Al fine di creare un modello che rispecchi il più possibile la situazione reale di un incendio di cumulo, sarebbe opportuno effettuare delle misure di temperatura durante le emergenze mediante degli strumenti appositi come dei termometri a infrarossi, e raccogliere quindi un insieme di dati in riferimento ai diversi tipi di rifiuti che bruciano, così da avere dei valori più affidabili per quanto riguarda le temperature raggiunte.

Portata e composizione dei fumi

La caratterizzazione del termine sorgente è completa quando vengono fornite informazioni sulla portata e la composizione dei fumi. Si tratta di aspetti complessi che richiedono uno studio approfondito e pertanto non verranno trattati all'interno di questo elaborato, ma saranno oggetto di studi successivi.

5.7 Conclusioni

Si conclude qui il presente lavoro di tesi, unitamente al tirocinio ad esso correlato svolto presso le strutture di Arpa. L'obiettivo prefissato, in accordo con Arpa Piemonte, era trovare un modello adatto alla caratterizzazione del termine sorgente di un incendio di rifiuti e comprendere se Phast potesse essere utilizzato per tale obiettivo.

Per svolgere un lavoro soddisfacente, si è resa necessaria una ricerca approfondita sul contesto legislativo dei rifiuti presentata all'interno del secondo capitolo, dalla quale sono emersi due aspetti: innanzitutto, la materia "rifiuti" è molto complessa perché richiede la collaborazione di diverse istituzioni e ciascuna si occupa di una parte di lavoro, ma spesso manca il dialogo tra esse; in secondo luogo, la normativa vigente ad essi relativa è in continua evoluzione e capita che, ad esempio, esista una legge a riguardo ma non siano ancora state pubblicate le indicazioni sul chi e sul come applicarla (come accaduto nel 2018, prima dell'emanazione delle Linee guida per la redazione di PEI e PEE).

Proseguendo col lavoro, dall'indagine sulla fenomenologia dell'incendio sono emerse molte difficoltà pratiche nell'identificazione di un modello matematico, come la definizione del

combustibile o le dimensioni del fenomeno. Phast si è rivelato essere un software intuitivo dalle molteplici funzionalità; tuttavia, al momento, non rappresenta lo strumento ideale per la descrizione del termine sorgente di un incendio di cumulo di rifiuti, sia perché non tratta sostanze solide, sia perché nasce, di base, con una prospettiva e con un intento differenti.

Per soddisfare le esigenze dell'Ente, è stato proposto quindi un modello alternativo basato su informazioni reperite in letteratura, al fine di descrivere adeguatamente il termine sorgente; si è resa necessaria la "creazione" di un modello ex-novo in quanto in letteratura, al momento, non esiste una metodologia adatta a soddisfare questa richiesta. Il modello, al momento implementato su Excel, è stato presentato in maniera tale da poter essere inserito all'interno del software Phast, per sopperire alla mancata rappresentazione di questa categoria di eventi all'interno del simulatore.

Si tratta di una prima proposta per caratterizzare un fenomeno complesso, ci sono alcuni aspetti che non sono stati esaminati ma che potrebbero essere spunto per successive migliorie, ad esempio il calcolo della durata totale dell'incendio, la possibilità di simulare incendi di cumulo di materiali differenti contemporaneamente (ad esempio, un misto carta-plastica), l'inclusione di più materiali all'interno del database (com'è stato già anticipato durante la presentazione del modello) o lo studio dell'influenza della forma fisica del rifiuto sulle dinamiche di combustione. In aggiunta, il modello è incompleto in quanto non fornisce alcuna informazione sui fumi di combustione (portata e composizione), che saranno presi in esame in studi successivi. Infatti, come è stato anticipato nell'introduzione, il presente elaborato è solo una parte di un progetto più ampio volto alla completa caratterizzazione degli incendi all'interno di impianti di rifiuti, che comprenda la conoscenza dei prodotti di combustione e delle aree di ricaduta di questi ultimi. Il fine ultimo del progetto è il confronto delle aree di ricaduta sia con quanto atteso dall'applicazione del Metodo ad Indici^[33], sia con i risultati dei campionamenti delle matrici ambientali effettuati dall'Ente e pubblicati all'interno delle relazioni tecniche di incendi occorsi.

In quest'ottica, la caratterizzazione del termine sorgente è fondamentale per poter proseguire lo studio della dispersione degli inquinanti in atmosfera e il modello "Incendio di cumulo" è un primo passo per la descrizione matematica di questo aspetto. A partire da questi risultati, sarà infatti possibile valutare l'utilità di Phast nello studio della dispersione dei prodotti di combustione e prendere in considerazione l'idea di utilizzarlo per il secondo step di questo progetto.

In conclusione, il presente lavoro ha fornito un modello ex-novo per una prima (parziale) caratterizzazione del termine sorgente e ha inoltre dimostrato che Phast non è al momento il programma adatto alla sua descrizione; tuttavia, non si esclude la possibilità che in futuro il programma possa essere aggiornato con un modello apposito né si esclude la di utilizzarlo per il proseguo di questo progetto.

6. Figure

- Figura 2. 1** Numero medio annuale degli eventi di incendio negli impianti di gestione rifiuti rilevati nei due periodi di indagine (Legislature XVII e XVIII) dal 2014 al 2019 compresi – Grafico preso dal rapporto della Commissione parlamentare di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti e su illeciti ambientali ad esse correlati. (Doc. XXIII n. 14, 4 agosto 2021). 6
- Figura 2. 2** Istogramma delle frazioni merceologiche ottenute dalla raccolta differenziata nella regione Piemonte (Ispra, s.d.). 12
- Figura 2. 3** Istogramma che rappresenta le tonnellate di rifiuti speciali prodotti nell'anno 2020 In Piemonte suddivisi per Capitolo dell'Elenco Europeo, in riferimento ai dati Ispra (Ispra, s.d.) 13
- Figura 2. 4** Schema semplificato sui principali adempimenti normativi per i gestori di rifiuti. 17
-
- Figura 3. 1** Istogramma rappresentativo degli incendi segnalati ad Arpa attraverso il servizio emergenze dal 2015 al 2021 (Arpa Piemonte, 2022). 31
- Figura 3. 2** Vista frontale e laterale del rilevatore multigas Dräger X-am® 7000; dispositivo portatile che permette una misura continua e simultanea di massimo cinque gas, vapori tossici o combustibili, con pompa incorporata. 35
- Figura 3. 3** Differenti sensori e apparecchiature utilizzati per il monitoraggio della qualità dell'aria. Nello specifico, si ha: a) Monitor portatile per la qualità dell'aria serie 500, compatibile con diverse testine intercambiabili che possono misurare fino a 16 diversi inquinanti, tra cui PM_{2,5}, PM₁₀, CO, CO₂, NO₂, VOC, O₃, SO₂, H₂S e altri; può essere usato per il monitoraggio in continuo e collegato a un controller esterno, allarmi o sistemi di gestione di un edificio; b) Testine intercambiabili del monitor series 500; c) Monitor series 500 con la testina montata, in funzione; d) Fotoionizzatore portatile TIGER con tecnologia PID brevettata da ION Science® per la misurazione dei COV, ha un intervallo di rilevamento dinamico da 0 a 20 mila ppm, ricaricabile, con batterie al litio; e) Rilevatore di gas tossici e ossigeno portatile (in figura è in carica sul supporto). 35
- Figura 3. 4** Fiale Dräger, singola e kit, affiancate da una tessera badge (per avere un riferimento sulle relative dimensioni). 36
- Figura 3. 5** Campionatori Canister del volume di 6 litri, vuoti, disponibili presso la sede di Arpa NO. 37
- Figura 3. 6** Campionatore ad alto volume Echo-Puf. 38
- Figura 3. 7** Piattaforma mobile per il monitoraggio della qualità dell'aria. 39
- Figura 3. 8** Foto dell'impianto interessato dagli incendi uno e due. a) vista dall'alto dell'impianto dove si può osservare la Piazzola Ecologica sul fondo ; b) foto che ritrae la zona degli incendi, nota come Piazzola ecologica, che si estende dietro al macchinario utilizzato per ridurre i rifiuti ingombranti in trucioli. 41
- Figura 3. 9** Riferimento cartografico che evidenzia i 7 punti di campionamento scelti per il monitoraggio degli inquinanti, tra cui anche il luogo dell'incendio. (Arpa, s.d.) 42
- Figura 3. 10** Foto prese dalla relazione tecnica Arpa in merito all'incendio di rifiuti avvenuto nella Ditta in questione in provincia di Alessandria. 44
- Figura 3. 11** Riferimento cartografico utile per i campionamenti effettuati in seguito all'incendio del 28 Ottobre presso la Ditta nel punto A della cartina geografica. (Arpa, s.d.) 45

Figura 3. 12 L'immagine a sinistra rappresenta la vista dell'incendio dall'esterno dello stabilimento, mentre a destra viene mostrata la situazione dall'interno. Le immagini risalgono al giorno Lunedì 12 agosto 2019. (Arpa, s.d.)	47
Figura 3. 13 Cartina geografica in cui si vedono chiaramente i punti di campionamento scelti, suddivisi per tipologia e riconoscibili grazie ai diversi colori utilizzati per i marker. Il sito dell'incendio è invece circondato da una linea spessa di colore rosso scuro, come riportato nella leggenda. I nomi dei siti sono stati censurati per questioni di privacy, e la loro conoscenza non è rilevante ai fini di questo elaborato (Arpa, s.d.)	48
Figura 4. 1 Curva Tempo-Potenza di un incendio generico.	53
Figura 4. 2 Curva tempo - temperatura incendio generico.	55
Figura 4. 3 Profilo di concentrazione di CO in funzione della distanza sottovento espressa in km per l'incendio di un serbatoio di petrolio per sei scenari differenti (Argyropoulos, C. D., et al., 2010).	56
Figura 4. 4 Esempio di materiali pirolizzanti, formazione del char (Stoliarov et al., 2014)	59
Figura 4. 5 Rappresentazione di un pool fire in assenza di vento (a sinistra) e in presenza di vento (a destra) (H. Longhua, 2017).	61
Figura 4. 6 Andamento della velocità massica di combustione per unità di superficie in riferimento a pool fire di benzina (Quincy, 1995).	62
Figura 4. 7 Velocità di combustione massica per unità di superficie in funzione del diametro della pool per: (a) metanolo; (b) etanolo; (c) 72,4% metanolo e 27,6% toluene; (d) eptano; (e) JP-8 (cherosene); e (f) toluene. I cerchi pieni rappresentano i risultati dello studio condotto da Ditch et al. (Ditch et al, 2013); i simboli aperti e lineari indicano, rispettivamente, prove in cui il livello del carburante è stato o non è stato controllato. I numeri in ogni legenda sono i numeri di riferimento associati ai dati utilizzati all'interno dello studio stesso. I risultati della correlazione empirica derivata in questo studio sono mostrati come linee continue.	63
Figura 4. 8 Rappresentazione del modello di schematizzazione di un pool fire su Phast.	67
Figura 5. 1 Grafico approssimativo che mostra la temperatura puntuale della fiamma misurata nel tempo.	78
Figura 5. 2 Rapporto tra i valori QA per metanolo (modello Phast) e PVC (modello Excel).	83
Figura 5. 3 Altezza delle fiamme in funzione del diametro.	84
Figura 5. 4 Variazione del rapporto L_f/D al crescere del diametro dell'incendio di cumulo.	84
Figura 5. 5 Istogramma rapporto L_c/D in funzione del diametro.	88
Figura 5. 6 L_c e L_f per le 6 tipologie di materiale scelto con un diametro di cumulo pari a 17.8 m.	89
Figura 5. 7 Altezza fiamme in funzione del diametro per PE, PS, PVC e Legno. I dati su PS e PVC sono molto vicini e di conseguenza non è possibile apprezzarne la differenza graficamente (per le proprietà si rimanda alla tabella 5.8)	89
Figura 5. 8 Procedura grafica per il calcolo della temperatura (Quintiere, 2016).	91

7. Tabelle

Tabella 2. 1 Dati di sintesi della produzione nazionale di rifiuti e della raccolta differenziata dei rifiuti urbani suddivisa per macroarea geografica ^[48] .	10
Tabella 2. 2 Produzione dei rifiuti speciali pericolosi e non pericolosi della regione Piemonte per Capitolo dell'Elenco Europeo dei Rifiuti ^[48] .	14
Tabella 4. 1 Calore di gassificazione di differenti sostanze e materiali. ^[39]	60
Tabella 4. 2 Entalpia di combustione ΔH_C di varie sostanze e materiali ^[39] .	70
Tabella 4. 3 Valori di aree scelti per le simulazioni e corrispondenti diametri.	73
Tabella 5. 1 Dati iniziali inseriti all'interno di Phast. I dati meteorologici derivano da impostazioni già presenti sul programma; i dati relativi al pool fire sono arbitrari.	76
Tabella 5. 2 Confronto tra i risultati ottenuti su Phast e quelli ricavati dall'applicazione delle equazioni prese dal libro "Principles of fire behaviour" ^[39] e implementate su Excel.	77
Tabella 5. 3 Confronto dati metanolo e PVC. Per "Fattore" si intende il rapporto tra il valore associato al metanolo e il valore associato al PVC. (Per il fattore PVC/met. associato a L, per quanto riguarda il PVC è stato utilizzato un valore medio tra i due estremi)	81
Tabella 5. 4 Dati meteorologici in riferimento ai tre casi di incendi occorsi descritti nelle relazioni tecniche fornite da Arpa Piemonte	81
Tabella 5. 5 Confronto risultati tra Phast (metanolo) ed Excel (PVC) con i dati meteorologici dell'incendio 1.	82
Tabella 5. 6 Confronto dei rapporti tra le potenze ottenute su Phast (metanolo) e su Excel (PVC) nei tre casi corrispondenti a condizioni meteo differenti. (E/P) indica che è stato effettuato il rapporto tra il valore fornito su Excel e quello fornito su Phast.	85
Tabella 5. 7 Confronto della potenza massima ottenuta Phast (metanolo) con quella ricavata dal modello Excel applicato PE, PS e legno.	86
Tabella 5. 8 Proprietà e fattori di rapporto per i diversi materiali adoperati nelle simulazioni	87
Tabella 5. 9 Calcolo del parametro $zQ2/5$ nei diversi casi.	91

8. Equazioni

Equazione (2. 1)	22
Equazione (4. 1)	69
Equazione (4. 2)	70
Equazione (4. 3)	71
Equazione (4. 4)	74
Equazione (5. 1)	75
Equazione (5. 2)	76
Equazione (5. 3)	79
Equazione (5. 4)	79
Equazione (5. 5)	79
Equazione (5. 6)	80
Equazione (5. 7)	90
Equazione (5. 8)	90
Equazione (5. 9)	90
Equazione (5. 10)	90
Equazione (5. 11)	90
Equazione (5. 12)	90
Equazione (5. 13)	90

9. Bibliografia

Angelo Robotto, Giuseppe Battarino & Cosimo Pulito, “Incendi in impianti di trattamento rifiuti – legalità e pianificazione per la prevenzione”, documentazione in riferimento al workshop del 27 giugno 2018 tenutosi a Torino. Sito web: “<http://www.arpa.piemonte.it/news/incendi-in-impianti-di-trattamento-rifiuti-legalita-e-pianificazione-per-la-prevenzione>”

Argyropoulos, C. D., et al. "Modelling pollutants dispersion and plume rise from large hydrocarbon tank fires in neutrally stratified atmosphere." *Atmospheric Environment* 44.6 (2010): 803-813

Arpa Piemonte, Banca Dati segnalazioni emergenziali, Documentazione interna

Arpa Piemonte, “Incendi negli impianti di trattamento rifiuti: Relazioni tecniche.”

Arpa Piemonte, “Matrice aria”, Allegato IV alla Procedura Tecnica per la Gestione delle emergenze ambientali U. RP. T170, approvata dal Direttore Tecnico il 19 novembre 2020

Arpa Piemonte, “*Procedura Tecnica per la Gestione delle emergenze ambientali U. RP. T170*”, approvata dal Direttore Tecnico il 19 novembre 2020

Baki M. Cetegen Tarek A. Ahmed Mechanical Engineering Department, University of Connecticut, Storrs, CT 06269-3139 USA Received 7 August 1992, Revised 17 November 1992, Available online 5 August 2003

Commissione parlamentare di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti e su illeciti ambientali ad esse correlati, DOC. XXIII N. 14 – Relazione sull’evoluzione del fenomeno degli incendi negli impianti di gestione di rifiuti – approvata dalla Commissione nella seduta del 4 agosto 2021 e comunicata alle Presidenze il 4 agosto 2021 ai sensi dell’articolo 1, comma 2, della legge 7 gennaio 2014, n. 100

Commissione parlamentare di inchiesta sulle attività illecite connesse al ciclo dei rifiuti e su illeciti ambientali ad esse correlati, DOC. XXIII N. 36, approvata dalla Commissione nella seduta del 30 gennaio 2018 e comunicata alle Presidenze il 30 gennaio 2018 ai sensi dell’articolo 1, comma 2, della legge 7 gennaio 2014, n.1

Decreto del Ministero dell’interno, “ *Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell’articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139.*”, 3 agosto 2015 www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/08/20/15A06189/sg

Decreto del Ministero dell’interno, “ *Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi per gli stabilimenti ed impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti.*”, 26 luglio 2022 www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/08/11/22A04489/sg

Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri, “*Approvazione delle linee guida per la predisposizione del piano di emergenza esterna e per la relativa informazione della popolazione per gli impianti di stoccaggio e trattamento dei rifiuti.*”, 27 agosto 2021 www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2021/10/07/21A05813/sg

Decreto del Presidente della Repubblica, “Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi, a norma dell’articolo 49, comma 4-quater, del decreto-legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122.”, 1° agosto 2011, n. 151

www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2011/09/22/011G0193/sg

Decreto-Legge 25 giugno 2008, n. 112 “Disposizioni urgenti per lo sviluppo economico, la semplificazione, la competitività, la stabilizzazione della finanza pubblica e la perequazione Tributaria.”

Decreto-Legge 4 ottobre 2018, n.113, Convertito in Legge il 1° dicembre 2018, n. 132 - “*Disposizioni urgenti in materia di protezione internazionale e immigrazione, sicurezza pubblica, nonché misure per la funzionalità del Ministero dell'interno e l'organizzazione e il funzionamento dell'Agenzia nazionale per l'amministrazione e la destinazione dei beni sequestrati e confiscati alla criminalità organizzata. (18G00140)*”, in vigore dal 5 ottobre 2018 - www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/10/04/18G00140/sg

Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 “Norme in materia ambientale. (GU Serie Generale n.88 del 14-04-2006 - Suppl. Ordinario n. 96)”

Decreto Legislativo 3 aprile 2006, Parte II “Norme in materia ambientale.” (GU Serie Generale n.88 del 14-04-2006 - Suppl. Ordinario n. 96)

Decreto Legislativo 3 aprile 2006, Parte IV “Norme in materia ambientale. (GU Serie Generale n.88 del 14-04-2006 - Suppl. Ordinario n. 96)”

Decreto Legislativo 3 settembre 2020, n.121 “*Attuazione della direttiva (UE) 2018/850, che modifica la direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti*”.
www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/09/14/20G00138/sg

Decreto Legislativo 3 settembre 2020, n.116 “*Attuazione della direttiva (UE) 2018/851 che modifica la direttiva 2008/98/CE relativa ai rifiuti e attuazione della direttiva (UE) 2018/852 che modifica la direttiva 1994/62/CE sugli imballaggi e i rifiuti di imballaggio. (20G00135)*”.
<https://www.gazzettaufficiale.it/do/atto/vediDirettive?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2020-09-11&atto.codiceRedazionale=20G00135>

Decreto Legislativo 4 marzo 2014, n.46, “*Attuazione della direttiva 2010/75/UE relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento)*”
<https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto-legislativo:2014-03-04;46>

Decreto Legislativo 26 giugno 2015, n.105 - “ Direttiva Seveso III”.
<https://www.mite.gov.it/pagina/la-direttiva-seveso-iii-decreto-legislativo-26-giugno-2015-ndeg105>

Defensie, TNO Kwaliteit van Leven TNO. "Methods for the calculation of physical effects: due to releases of hazardous materials (liquids and gases)(" Yellow Book")." (2005). C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings

Ditch, Benjamin D., et al. "Pool fires–An empirical correlation." *Combustion and flame* 160.12 (2013): 2964-2974.

DNV, Det Norske Veritas – Software, March 2019, available on Phast© guide

G. Heskestad, "Venting Practices," sec. 6, chap. 10 in *Fire Protection Handbook*, 17th ed., edited by A. E. Cote and J. L. Linville (Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1991), 6.104-6.116.

Hamins, Anthony, Anthony Hamins, and Andrew Lock. *The structure of a moderate-scale methanol pool fire*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2016.

Hu, Longhua. "A Review of Physics and Correlations of Pool Fire Behaviour in Wind and Future Challenges." *Fire Safety Journal* 91 (2017): 41-55. Web

Hu, Longhua. "A Review of Physics and Correlations of Pool Fire Behaviour in Wind and Future Challenges." *Fire Safety Journal* 91 (2017): 41-55. Web; Fig. 1 - The physics of a pool fire, pag 42.

Johnson, A.D., 1992, "A model for predicting thermal radiation hazards from large-scale LNG pool fires", *ICHEME Symp. Series*, 130: 507-524

Legge Regionale 13 aprile 1995, n.60 "Istituzione dell'Agenzia regionale per la protezione ambientale". www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1995/12/16/095R0745/s3

Legge Regionale n.18 "Nuova disciplina dell'Agenzia regionale per la protezione ambientale del Piemonte (ARPA)", approvata il 26 settembre 2016 Capo I. DISPOSIZIONI GENERALI "Linee guida per la predisposizione del PIANO DI EMERGENZA ESTERNA E PER LA RELATIVA INFORMAZIONE DELLA POPOLAZIONE per gli impianti di stoccaggio e trattamento rifiuti", luglio 2021. Allegato al Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri 27 agosto 2021.

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare: "Direzione generale per i rifiuti e l'inquinamento. Protocollo 0004064"; 15 Marzo 2018

Ministero dell'Interno e del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Circolare ministeriale n. 3058 "Disposizioni attuative dell'art. 26-bis, inserito dalla legge 1° dicembre 2018, n. 132 – prime indicazioni per i gestori degli impianti", 13 febbraio 2019

Ministero dell'Interno e del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Circolare ministeriale n. 4064 "Linee guida per la gestione operativa degli stoccaggi negli impianti di gestione dei rifiuti e per la prevenzione dei rischi", pubblicata il 18 marzo 2018.

Ministero della salute Direzione generale della prevenzione sanitaria Direzione generale della comunicazione e dei rapporti europei e internazionali; <https://www.salute.gov.it> Anno 2015

Pasquill, Frank. "The estimation of the dispersion of windborne material." *Met. Mag.* 90 (1961): 33.

Pritchard, M. J. and Binding, T. M., 1992, FIRE2: A new approach for predicting thermal radiation levels from hydrocarbon pool fires, *ICHEME Symposium Series No. 130*, 491±505

Quintiere, James G. *Principles of fire behavior*. CRC Press, 2016.

Rapporti Istisan 16|15; ISSN: 1123-3117 (cartaceo) * 2384-8936 (online) "Presenza di CO2 e H2S in ambienti indoor: attuali conoscenze e letteratura scientifica"

Regione Piemonte: Legge Regionale 26 settembre 2016, n. 18 "Nuova disciplina dell'Agenzia regionale per la protezione ambientale del Piemonte (ARPA)". www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2017/03/04/16R00471/s3

Regolamento (CE) n. 850/2004 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 29 aprile 2004, relativo agli inquinanti organici persistenti e che modifica la direttiva 79/117/CEE, “*Tutela della salute e dell’ambiente dagli inquinanti organici persistenti*”.

Regolamento CLP <https://www.inail.it/cs/internet/attivita/prevenzione-e-sicurezza/conoscere-il-rischio/agenti-chimici/regolamento-clp.html>

Rew, P. J., W. G. Hulbert, and D. M. Deaves. "Modelling of thermal radiation from external hydrocarbon pool fires." *Process safety and environmental protection* 75.2 (1997): 81-89

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Copyright© 1995, National Fire Protection Association, Quincy, MA 02269

Sistema Nazionale per la Protezione dell’Ambiente, “Linee guida SNPA per la gestione delle emergenze derivanti da incendi”, approvata dal Consiglio SNPA nella seduta del 18 maggio 2021, Doc. n. 107/21

Sito web Arpa Piemonte: <http://www.arpa.piemonte.it/>

Sito web del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco: <https://www.vigilfuoco.it>

Sito web Ispra: <https://www.isprambiente.gov.it/it>

Sito web Treccani: <https://www.treccani.it>

Yang, H., and H. Chen. "State key laboratory of coal combustion, huazhong university of science and technology, wuhan, pr china." *Gasification for Synthetic Fuel Production: Fundamentals, Processes and Applications* 241 (2014).

Stoliarov, Stanislav I, Sean Crowley, Richard N Walters, and Richard E Lyon. “Prediction of the Burning Rates of Charring Polymers.” *Combustion and Flame* 157.11 (2010): 2024-034. Web.

Witlox, Henk WM, et al. Verification and validation of consequence models for accidental releases of toxic or flammable chemicals to the atmosphere. In: *Mary K O’Connor Process Safety Symposium. Proceedings 2017*. Mary Kay O’Connor Process Safety Center, 2017

Yao, Yongzheng, Ying Zhen Li, Haukur Ingason, and Xudong Cheng. “Scale Effect of Mass Loss Rates for Pool Fires in an Open Environment and in Tunnels with Wind.” *Fire Safety Journal* 105 (2019): 41-50. Web

| THEORY | Phast | www.dnvgl.com/software © DNV GL AS. All rights reserved

| THEORY | Pool Fire Model | www.dnvgl.com/software © DNV GL AS. All rights reserved

10. Appendice

Si riportano di seguito le categorie di dati di input e output richieste in Phast.

Ambient data

In questa categoria rientrano i dati relativi alle condizioni atmosferiche, tra cui:

- la velocità del vento u_a [m/s];
- la temperatura atmosferica misurata nell'ambiente circostante T_a [K];
- la frazione di umidità relativa r_h ; che assume un valore standard di 0.7 che verrà mantenuto costante nelle simulazioni effettuate;
- la classe di stabilità atmosferica (a cui verrà dedicato un paragrafo successivamente);
- altri parametri più complessi relativi al mixing layer, cioè la parte di atmosfera che risponde direttamente ai cambiamenti che avvengono sulla superficie terrestre, la cui estensione dipende dalle condizioni meteorologiche e che varia quindi in base alla classe di stabilità atmosferica considerata, che non verranno presi in considerazione.

Phast dispone di tre cartelle all'interno della sezione weather ciascuna corrispondente a tre condizioni atmosferiche differenti e pre-impostate alle quali è associata una classe di stabilità atmosferica e una velocità del vento, mentre gli altri parametri sono mantenuti costanti. In aggiunta, il programma permette di creare una nuova "*Weather folder*", nella quale si possono definire le condizioni meteorologiche desiderate inserendo la velocità del vento u_a [m/s] e la classe di stabilità atmosferica; quest'ultima è accompagnata da una breve descrizione che facilita la scelta (ad esempio, molto sole e vento forte, o simili, come si può vedere in tabella A.1). Dopo aver impostato questi due dati, si apre una sezione nella quale si possono modificare alcuni parametri atmosferici già presenti di default, come la temperatura atmosferica (°C), o l'altezza del mixing layer. Durante le simulazioni verrà impostata la temperatura atmosferica desiderata, perché è un dato molto semplice da reperire e di cui è facile avere delle stime approssimative; per quanto riguarda i parametri relativi al mixing layer invece non verranno effettuate delle modifiche ma si utilizzeranno le impostazioni di base presenti.

Classi di stabilità atmosferica

Per la classificazione della stabilità atmosferica si utilizza il metodo di Pasquill-Gifford, ideato nel 1961 dall'omonimo scienziato, secondo cui la turbolenza atmosferica viene suddivisa in sei classi di stabilità ordinate dalla più instabile alla più stabile, ciascuna associata a una lettera dell'alfabeto, dalla A (condizioni estremamente instabili) alla G (condizioni estremamente stabili). Quando si è nel caso di atmosfera stabile in genere si osservano concentrazioni di inquinanti elevate perché la dispersione è limitata, in quanto le condizioni meteorologiche sono molto stabili e non si ha trascinarsi degli inquinanti lontano dal punto di emissione; al contrario, quando l'atmosfera è instabile gli inquinanti si disperdono rapidamente in un'area molto più estesa e con concentrazioni molto inferiori, e questo si interpreta positivamente perché a concentrazioni inferiori sono meno dannose e meno pericolose, a parità di quantitativi emessi.

Per il calcolo della classe è necessario conoscere la velocità del vento al suolo misurata a 10 metri di altezza rispetto alla superficie, e la radiazione solare diurna incidente o la percentuale notturna di copertura nuvolosa. A titolo di esempio, viene riportata in figura A.1 una delle numerose tabelle che si possono trovare in letteratura, utilizzabili per derivare la classe di stabilità, noti i parametri citati precedentemente.

Surface wind speed (m/s)	Daytime insolation ³			Nighttime conditions ⁴	
	Strong	Moderate	Slight	Thin overcast or >4/8 low cloud	≤3/8 cloudiness
<2	A	A-B	B	F ⁵	F ⁵
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D ⁶	E
4-6	C	C-D	D ⁶	D ⁶	D ⁶
>6	C	D ⁶	D ⁶	D ⁶	D ⁶

Stability classes:

- A, extremely unstable
- B, moderately unstable
- C, slightly stable
- D, neutrally stable
- E, slightly stable
- F, moderately stable

¹F. A. Gifford, "Use of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion," *Nuclear Safety* (1961), 2(4): 47.

²F. A. Gifford, "Turbulent Diffusion-Typing Schemes: A Review," *Nuclear Safety* (1976), 17(1): 68.

³Strong insolation corresponds to a sunny midday in midsummer in England. Slight insolation to similar conditions in midwinter.

⁴Night refers to the period 1 hour before sunset and 1 hour after dawn.

⁵These values are filled in to complete the table.

⁶The neutral category D should be used, regardless of wind speed, for overcast conditions during day or night and for any sky conditions during the hour before or after sunset or sunrise, respectively.

Figura A. 1 Classi di stabilità atmosferica di Pasquill^[37].

Nel momento in cui viene richiesto di effettuare la scelta della classe atmosferica durante l'impostazione di una nuova "weather folder", l'utente viene guidato dalla presenza all'interno del software di una breve descrizione delle classi di stabilità, che viene riportata nella tabella sottostante (tabella A.1).

Tabella A. 1 Classi di stabilità atmosferica presenti su Phast

Classe	Descrizione
A	Very unstable - sunny, light winds
A/B	Unstable - as with A only less sunny or more windy
B	Unstable - as with A/B only less sunny or windier
B/C	Moderately unstable - moderate sun and moderate wind
C	Moderately unstable - very windy/sunny or overcast/ light wind
C/D	Moderately unstable - moderate sun and high wind
D	Neutral - little sun and high wind or overcast/windy night
E	Moderately stable - less overcast and less windy night than D
F	Stable - night with moderate clouds and light/moderate wind
G	Very stable - possibly fog

Pool data

Questa sezione riguarda le impostazioni relative alla pozza, ovvero:

- il diametro D_{pool} [m]. L'impostazione del diametro può essere scelta come valore fisso, nel caso in cui la pozza sia statica (come nel caso in cui si abbia sversamento all'interno di un bacino di contenimento, per cui il diametro della pozza è costante e pari al diametro della vasca), o come valore massimo, nel caso in cui si presenti la situazione dove il combustibile fuoriesce in continuo da una sorgente (ad esempio un serbatoio o una tubazione) e si spanda sul terreno fino a raggiungere un diametro massimo. Durante le simulazioni non verranno mai considerate delle pool in espansione, ma si farà sempre riferimento al caso statico con un diametro fisso;
- l'altezza della pozza rispetto al suolo z_{pool} [m], che verrà sempre posta pari a zero;
- la velocità di sversamento del liquido S_{pool} [kg/s]. Nelle simulazioni questo valore verrà impostato pari a 0 m/s, perché bisogna tener presente che in realtà si tratta di un cumulo di rifiuti, il quale non si spande sul terreno come invece può succedere nel caso di un liquido;
- caratteristiche del luogo di sversamento; si può selezionare se simulare il pool fire in uno spazio costituito da terreno (land) o da uno specchio d'acqua (water); durante le simulazioni effettuate verrà sempre selezionata la voce "land", sempre in analogia con l'incendio del cumulo di rifiuti;
- la temperatura del liquido costituente la pozza T_{pool} [°C], che viene accettata se pari, o inferiore alla temperatura di evaporazione alle condizioni atmosferiche impostate. Questo parametro non verrà mai modificato e si assumeranno sempre valide le impostazioni generate automaticamente dal programma; questa scelta dipende dal fatto che materiali solidi e combustibili liquidi (come GPL, metano, o altri ...) sono caratterizzati da una forte differenza nella temperatura che caratterizza la transizione tra lo stato solido, allo stato liquido, allo stato vapore; quindi, questo dato deve rispecchiare le caratteristiche del combustibile utilizzato per la simulazione, ragion per cui verrà assunto valido il valore fornito dal software;
- impostazione del calcolo della potenza radiante E_f [kW/m²], è automatico e risulta pre-impostato dal programma.

La forma della pozza è sempre circolare e il centro è collocato con coordinate (0, 0, z_{pool}), espresse sempre secondo le unità di misura del Sistema Internazionale [m].

Per completezza, si riporta in figura A.2 un esempio di come appare l'interfaccia del programma con l'utente; come si può notare l'impostazione dei parametri base è molto intuitiva ma anche molto semplice, e quindi permette poche modifiche e pochi scostamenti dal calcolo base.

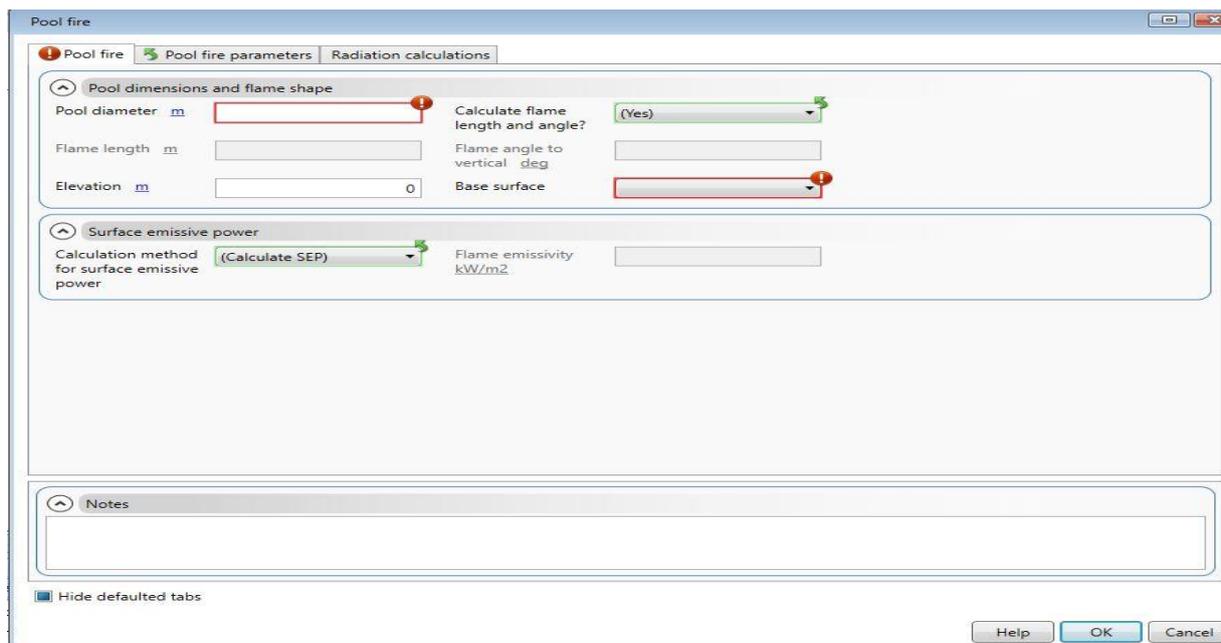


Figura A. 2 Interfaccia utente per l'impostazione di alcuni parametri di un pool fire.

Fuel properties

L'ultima categoria di dati iniziali riguarda proprietà del combustibile, “*fuel properties*”, e si riconduce a una sola scelta: la sostanza liquida combustibile con cui effettuare la simulazione. Il programma si aspetta che venga inserito un combustibile in fase liquida da selezionare tra quelli presenti nel database e precedentemente selezionato nella sezione *materials*; le proprietà sono quindi impostate automaticamente dal programma, in riferimento allo stato liquido della sostanza considerata.

Per completezza, si è scelto di riportare in tabella A.2 la lista delle sostanze disponibili su Phast associate al rispettivo codice CAS, un codice identificativo numerico che individua univocamente una sostanza chimica.

Tabella A. 2 Composti disponibili su Phast nella sezione “Materials”.

Composti	CAS	Composti	CAS
Acetone	67641	Hydrogen sulfide	7783064
Acrolein	107029	Isobutanol	78831
Acrylamide	79061	Isopropanol	67630
Acrylonitrile	107131	Methane	74828
Air	132259100	Methanol	67561
Benzene	71432	Methyl bromide	74839
Benzyl chloride	100447	Methyl isocyanate	624839
1,3-butadiene	106990	Methylamine	74895

N- butane	106978	Nitrogen	7727379
N- butanol	71363	Oxygen	7782447
N-butyl acrylate	141322	Nitric acid	7697372
1-butene	106989	Nitrogen dioxide	2440
Carbon disulfide	75150	Nitric oxide	10102439
Carbon dioxide	124389	N-nonane	111842
Carbon monoxide	630080	N-octae	111659
Chlorine	7782505	N-pentane	109660
Dichloromethane	75092	Phenol	108952
Dimethylamine	124403	Phosgene	75445
Ethane	74840	Propane	74986
Ethanol	64175	Propylene	115071
Ethylene	74851	1,2- propylene oxyde	75569
Ethylene oxide	75218	Styrene	100425
N-heptane	142825	Sulfur dioxide	7446095
N-hexane	110543	Toluene	108883
Hydrazine	302012	Triethylamine	121448
Hydrogen	1333740	Trimethylamine	75503
Hydrogen chloride	7647010	Vinyl acetate	108054
Hydrogen cyanide	74908	Vinyl chloride	75017
Hydrogen fluoride	7664393	Water	7732184
Hydrogen peroxide	7722841	M-xylene	108383

Una volta chiariti i paramtri di input e le limitazioni insite nel programma, vediamo ora quali sono invece gli output del programma, e che tipo di considerazioni ci permettono di fare.

Parametri di output

I principali output del programma sono:

- l'altezza della fiamma L_f [m];
- l'angolo relativo tra l'asse del pool fire e la verticale α [°];
- la potenza radiante E_f [kW/m²];
- la velocità massica di combustione \dot{m} [kg/s].

11. Ringraziamenti

Ringrazio il mio Relatore, il professor Marmo Luca, per la sua disponibilità e per i suoi suggerimenti pratici, e il mio Correlatore, il professor Andrea Carpignano, per i consigli ricevuti e per le preziose indicazioni; entrambi sono stati di grande supporto per il lavoro svolto e hanno saputo guidarmi durante questo percorso.

Vorrei ringraziare tutto il dipartimento di Torino di Arpa Piemonte e tutti i tecnici e gli ingegneri che ci lavorano per avermi dato l'opportunità di svolgere la tesi e il tirocinio ad essa associato presso la loro struttura, permettendomi di vivere un'esperienza formativa, intensa e soddisfacente, che ha rispecchiato appieno le mie aspettative. In particolare, vorrei ringraziare l'ingegner Basso, Barbara, la mia instancabile tutor, per avermi seguito passo passo nella stesura dell'elaborato, per la pazienza, la disponibilità e per tutto il supporto ricevuto, grazie di cuore. Un sentito grazie (e un grosso in bocca al lupo) anche a Fede, amica e collega, a cui cedo il testimone.

Ringrazio l'ingegner Buonanno, Michele, per avermi permesso di avvicinarmi a questo progetto e per avermi incoraggiato nell'intraprendere questa strada, permettendomi di vivere un'esperienza arricchente che mi ha formata come studentessa ma, soprattutto, come persona.