



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

**UTILIZZO SISTEMATICO DI UN PROGRAMMA
DI SIMULAZIONE DI INCENDIO A CASISTICHE PROPRIE
DELLE APPLICAZIONI NUCLEARI**

Ing. Antonella Linda Di Nallo

Tutor: Ing. Barbara Giannone

Co-tutor: Ing. Andrea Orazi

Data	Firma Stagista	Firma Tutor	Firma Responsabile Servizio

Progetto formativo

Utilizzo sistematico di un programma di simulazione di incendio a casistiche proprie delle applicazioni nucleari

Abstract

Oggetto del presente lavoro è lo studio di metodologie di analisi del comportamento degli impianti nucleari in condizioni incidentali con particolare riferimento all'evento incendio. In particolare si è focalizzata l'attenzione sull'effetto di un incendio in un deposito di rifiuti radioattivi provenienti dall'attività e dallo smantellamento di una centrale nucleare di potenza. Seguendo un approccio di tipo prestazionale sono state analizzate alcune delle grandezze fisiche coinvolte nell'evento. Il modello utilizzato è stato l'FDS (*Fire dynamics simulation*) prodotto dal NIST. Attraverso la simulazione è stata analizzata la risposta del deposito e dei materiali in esso contenuti rispetto all'incendio al fine di verificare il rispetto degli obiettivi di radioprotezione in termini di rilasci e quindi di dosi all'ambiente e alle persone.

Prefazione

Lo studio del comportamento di un impianto nucleare a fronte di eventi che possono verificarsi durante la vita dell'impianto, in condizioni di normale funzionamento o in condizioni incidentali o anomale, prende il nome di "analisi di sicurezza". Essa viene sviluppata a fine di verificare il rispetto, a seguito della risposta dell'impianto con tutte le sue misure di prevenzione e protezione dal punto di vista della sicurezza nucleare, degli obiettivi di radioprotezione per gli operatori e la popolazione. L'analisi di sicurezza viene sviluppata per ogni tipo di installazione nucleare, sia esso impianto di potenza o di ricerca oppure di confezionamento del combustibile nucleare o ancora di stoccaggio dei rifiuti radioattivi.

Per lo studio in esame è stato preso in considerazione un deposito di rifiuti radioattivi derivanti dall'attività operativa e dall'attività di smantellamento di una centrale di potenza.

La scelta è stata dettata anche dal fatto che in Italia, a seguito dei referendum abrogativi del 1987, le centrali presenti sul territorio nazionale sono state fermate definitivamente e al momento è in atto la fase di smantellamento delle medesime e di conferimento dei rifiuti da esse derivanti in apposite installazioni, al momento temporanee, in grado di confinare detti materiali in sicurezza in termini di radioprotezione. Pertanto lo studio effettuato è risultato di particolare interesse per la situazione contingente italiana.

In particolare è stato studiato l'impatto di un incendio su un deposito di rifiuti a bassa e media attività (rifiuti di II categoria ovvero *low level waste - LLW*, Guida Tecnica 26), anche se ritenuto evento altamente improbabile, dal momento che l'incendio è uno tra gli eventi in grado di generare potenzialmente dosi all'esterno significative in base alla risposta dell'edificio e dei materiali in esso contenuti.

Nella presente tesi di stage sono riportati l'analisi e i risultati della simulazione di detto evento con l'ausilio del codice fluidodinamico FDS (*Fire dynamics simulation*).

INDICE

Introduzione	4
Metodologia	4
Capitolo 1	5
L'incendio e la prevenzione incendi	
1.1 Principi della combustione	5
1.2 Dinamica e cause dell'incendio	17
1.3 Analisi del rischio incendio	19
Capitolo 2	26
Strategie e metodologie per l'analisi degli scenari di incendio	
2.1 Strategie di prevenzione incendi	26
2.2 Fire Dynamics Simulation (FDS)	28
Capitolo 3	41
Simulazioni di incendio con il codice FDS	
3.1 Caso studio generico 1	42
3.2 Caso studio generico 2	50
Capitolo 4	53
L'analisi e la simulazione con FDS dell'evento incendio in un'installazione nucleare	
4.1 L'evento incendio nelle installazioni nucleari	53
4.2 Analisi dell'evento incendio in un deposito di rifiuti radioattivi di II categoria	56
4.3 Analisi dei risultati	62
Conclusioni	72
Bibliografia	73

Introduzione

Come già ampiamente descritto nella prefazione, oggetto del presente lavoro di stage è stata l'analisi, attraverso simulazione con il codice FDS, dell'impatto di un incendio su un deposito di rifiuti radioattivi di II categoria al fine di verificare il rispetto dei requisiti di sicurezza e degli obiettivi di radioprotezione per gli operatori e per la popolazione.

Il documento di tesi è strutturato essenzialmente in quattro parti: una prima parte in cui vengono descritti brevemente i fondamenti sull'incendio e sulla prevenzione incendi, una seconda parte in cui vengono presentati gli approcci utilizzati nella prevenzione incendi, con particolare riferimento all'utilizzo dei codici di calcolo, una terza parte in cui sono presentate le analisi sviluppate attraverso l'ausilio del codice di calcolo FDS relative a casi generici di incendio e una parte finale di applicazione del codice al caso specifico in esame. Nella parte conclusiva della tesi sono riportati i risultati dello studio in esame con relativa discussione.

Metodologia

L'attività di stage si è sviluppata in una prima fase di acquisizione da parte della stagista dei fondamenti degli impianti nucleari e della sicurezza nucleare.

In parallelo è stata effettuata una analisi dei codici di calcolo ad oggi disponibili per la simulazione dell'incendio, con particolare riferimento al codice FDS al fine di verificarne l'applicabilità nell'ambito del caso in esame.

È seguita una fase di applicazione del codice FDS a casi di incendio generici per prendere confidenza con il codice medesimo e per la messa a punto dei parametri fondamentali.

Infine, con l'ausilio del FDS, è stato analizzato il caso di incendio in esame. L'esito di tale analisi è sintetizzato in tabelle, curve e schemi grafici in grado di rappresentare in maniera chiara i principali parametri di interesse del fenomeno studiato.

Capitolo 1

L'incendio e la prevenzione incendi

1.1 I principi della combustione

La combustione è una reazione chimica sufficientemente rapida di una sostanza combustibile con un comburente che dà luogo allo sviluppo di calore, fiamma, gas, fumo e luce.

Le condizioni necessarie per avere una combustione sono tre:

- Presenza del combustibile.
- Presenza del comburente.
- Presenza di una sorgente di calore.

Pertanto solo la contemporanea presenza di questi tre elementi dà luogo al fenomeno dell'incendio, e, di conseguenza, al mancare di almeno uno di essi l'incendio si spegne.

Quindi per ottenere lo spegnimento dell'incendio si può ricorrere alla combinazione dei seguenti tre sistemi:

- Esaurimento del combustibile, ovvero allontanamento o separazione della sostanza combustibile dal focolaio di incendio.
- Soffocamento: separazione del comburente dal combustibile o riduzione della concentrazione di comburente in aria.
- Raffreddamento: sottrazione di calore fino ad ottenere una temperatura inferiore a quella necessaria al mantenimento della combustione.

Normalmente nello spegnimento dell'incendio si utilizza una combinazione dei sistemi suddetti.

La combustione può avvenire con o senza sviluppo di fiamme superficiali. La combustione senza fiamma superficiale avviene generalmente quando la sostanza combustibile non è più in grado di sviluppare particelle volatili.

Solitamente il comburente è l'ossigeno contenuto nell'aria, ma sono possibili incendi di sostanze che contengono nella loro molecola una quantità di ossigeno sufficiente a determinare una combustione, quali ad esempio, gli esplosivi e la celluloidi.

Proprio perché nella quasi totalità dei casi la sostanza comburente è l'ossigeno contenuto naturalmente nell'aria ne consegue che esso si caratterizza per tipo di combustibile e tipo di sorgente di innesco; si ha pertanto una classificazione secondo lo stato fisico dei materiali combustibili che distingue gli incendi in quattro classi:

- **Classe A**, relativa a incendi di materiali solidi.
- **Classe B**, relativa a incendi di liquidi infiammabili.
- **Classe C**, relativa a incendi di gas infiammabili.
- **Classe D**, relativa a incendi di materiali combustibili.

A queste classi occorre aggiungerne un'altra che tenga conto degli incendi di natura elettrica. In totale cinque classi che consentono l'identificazione della classe di rischio d'incendio a cui corrisponde, come vedremo in seguito, una precisa azione operativa antincendio con un'opportuna scelta del tipo di estinguente.

La seconda classificazione degli incendi si basa sulla tipologia di sorgente di innesco e si compone di quattro voci:

- **Accensione diretta**: fenomeno per cui una fiamma, una scintilla o altro materiale incandescente entra in contatto con un materiale combustibile in presenza di ossigeno.
- **Accensione indiretta**: fenomeno per cui il calore d'innesco avviene nelle forme della convezione, conduzione e irraggiamento termico.
- **Attrito**: fenomeno per cui il calore è prodotto dallo sfregamento di due materiali.
- **Autocombustione o riscaldamento spontaneo**: in questo caso il calore è prodotto dallo stesso combustibile come nel caso di lenti processi di ossidazione, reazioni chimiche, decomposizioni esotermiche in assenza di aria, azione biologica.

I **prodotti della combustione** sono: gas di combustione, fiamme, fumo e calore. Di seguito vengono analizzati nel dettaglio.

I **gas di combustione** (Tabella 1.1.1) sono costituiti dai prodotti della combustione che rimangono allo stato gassoso anche quando raffreddandosi raggiungono la temperatura ambiente di riferimento di 15°C. La loro produzione dipende dal tipo di combustibile, dalla percentuale di ossigeno presente e dalla temperatura raggiunta nell'incendio e, nella maggior parte dei casi, la mortalità per incendio è dovuta alla loro inalazione che produce danni biologici per anossia o per tossicità.

Tabella 1.1.1: principali gas di combustione

Ossido di carbonio [CO]	Aldeide acrilica [CH ₂ CHCHO]
Anidride carbonica [CO ₂]	Fosgene [COCl ₂]
Idrogeno solforato [H ₂ S]	Ammoniaca [NH ₃]
Anidride solforosa [SO ₂]	Ossido e perossido di azoto [NO e ???]
Acido cianidrico [HCN]	Acido cloridrico[HCL]

Le **fiamme** sono costituite da emissione di luce conseguente alla combustione dei gas sviluppatasi in un incendio. Nel caso di incendi di combustibili gassosi è possibile valutare approssimativamente il valore raggiunto dalla temperatura di combustione dal colore della fiamma, come evidenziato dal grafico seguente (Tabella 1.1.2).

Tabella 1.1.2: scala cromatica delle temperature nella combustione dei gas

Colore della fiamma	Temperatura (°C)
Rosso nascente	525
Rosso scuro	700
Rosso ciliegia	900
Giallo scuro	1100
Giallo chiaro	1200
Bianco	1300
Bianco abbagliante	1500

I fumi sono costituiti da piccolissime particelle solide e liquide, le prime, costituite da sostanze incombuste che si formano quando la combustione avviene in carenza di ossigeno e vengono trascinate dai gas caldi prodotti dalla combustione stessa dando luogo a fumo di colore scuro, le seconde, da vapor d'acqua che al di sotto dei 100°C condensa dando luogo a fumo di colore bianco.

Il calore è la causa principale della propagazione degli incendi. Realizza l'aumento della temperatura di tutti i materiali e i corpi esposti, provocandone il danneggiamento fino alla distruzione.

I parametri fisici della combustione

Di seguito sono considerati i parametri fisici della combustione:

- Temperatura di accensione
- Temperatura teorica di combustione
- Area teorica di combustione
- Potere calorifico.
- Temperatura di infiammabilità
- Limiti di infiammabilità e di esplosibilità.

Temperatura di accensione (o di autoaccensione): è la minima temperatura alla quale la miscela combustibile-comburente inizia a bruciare spontaneamente in modo continuo senza ulteriore apporto di calore o di energia dall'esterno. È funzione del tipo di combustibile; nella Tabella 1.1.3 sono riportati le temperature di accensione di alcuni combustibili.

Tabella 1.1.3

Sostanza	Temperatura di accensione (°C)
Acetone	540
Benzina	250
Gasolio	220
Idrogeno	560
Alcool metilico	455
Carta	230
Legno	220-250
Gomma sintetica	300
Metano	537

Temperatura teorica di combustione: rappresenta il più elevato valore di temperatura che è possibile raggiungere nei prodotti di combustione di una sostanza (alcuni esempi sono riportati nella Tabella 1.1.4).

Tabella 1.1.4

Sostanza	Temperatura di combustione (°C teorici)
Idrogeno	2205
Metano	2050
Petrolio	1800
Propano	2230

Area teorica di combustione: è rappresentata dalla quantità di aria necessaria per raggiungere la combustione completa di tutti i materiali combustibili (alcuni esempi sono riportati nella Tabella 1.1.5).

Tabella 1.1.5

Sostanza	Area teorica di combustione
Legno	5
Carbone	8
Benzina	12
Alcool etilico	7,5
Polietilene	12,2
Propano	13
Idrogeno	28,5

Potere calorifico: è la quantità di calore prodotta dalla combustione completa dell'unità di massa o di volume di una determinata sostanza combustibile; si distingue in potere calorifico superiore e inferiore, a seconda che si consideri o meno il calore di condensazione del vapor acqueo prodotto. Nella prevenzione incendi si utilizza solitamente quello inferiore (alcuni esempi sono riportati nella Tabella 1.1.6).

Tabella 1.1.6

Sostanza	Potere calorifico inferiore (MJ/kg)
Legno	17
Carbone	30-34
Benzina	42
Alcool etilico	25
Polietilene	35-45
Propano	46
Idrogeno	120

Temperatura di infiammabilità: è la temperatura minima alla quale i combustibili emettono vapori in quantità tali da incendiarsi in caso di innesco (alcuni esempi sono riportati nella Tabella 1.1.7).

Tabella 1.1.7

Sostanza	Temperatura di infiammabilità
Gasolio	65
Acetone	-18
Benzina	-20
Alcool metilico	11
Alcool etilico	13
Toluolo	4
Olio lubrificante	149

Limiti di infiammabilità: individuano il campo di infiammabilità all'interno del quale si ha, in caso di innesco, l'accensione e la propagazione della fiamma nella miscela. Si distinguono in limite di infiammabilità inferiore e superiore, ovvero la più bassa concentrazione in volume di vapore della miscela al di sotto della quale non si ha accensione in presenza di innesco per carenza di combustibile e la più alta concentrazione in volume di vapore della miscela al di sopra della quale non si ha accensione in presenza di innesco per eccesso di combustibile. Alcuni esempi sono riportati in Tabella 1.1.8.

Tabella 1.1.8

Sostanza	Limite inferiore di infiammabilità	Limite superiore di infiammabilità
Acetone	2,5	13
Ammoniaca	15	18
Benzina	1	6,5
Gasolio	0,6	6,5
Idrogeno	4	75,6
Metano	5	15

Limiti di esplosibilità: individuano l'intervallo delle concentrazioni in volume di vapore per cui si ha o meno esplosibilità in caso di innesco. In particolare il limite inferiore di esplosibilità è la più bassa concentrazione in volume di vapore della miscela al di sotto della quale non si ha esplosione in presenza di innesco e la più alta concentrazione in volume di vapore nella miscela al di sopra della quale non si ha esplosione in presenza di innesco.

Combustione delle sostanze solide, liquide e gassose

Combustione delle sostanze solide

La combustione delle sostanze solide è caratterizzata dai seguenti parametri:

- Pezzatura e forma del materiale.
- Grado di porosità del materiale.
- Elementi che compongono la sostanza.
- Contenuto di umidità del materiale.
- Condizioni di ventilazione.

Questo processo porta alla formazione di braci che sono costituite dai prodotti della combustione dei residui carboniosi della combustione stessa.

Combustione dei liquidi infiammabili

I liquidi sono in equilibrio con i propri vapori che si sviluppano in misura differente a seconda delle condizioni di pressione e temperatura sulla superficie di separazione tra pelo libero del liquido e mezzo che lo sovrasta.

Nei liquidi infiammabili la combustione si ha quando in corrispondenza di tale superficie i vapori si innescano, mescolandosi con l'ossigeno dell'aria in concentrazioni comprese nel campo di infiammabilità.

I liquidi infiammabili possono essere classificati in tre categorie (Tabella 1.1.9) in base all'indice di combustibilità che è fornito dalla temperatura di infiammabilità del liquido (Tabella 1.1.10).

Tabella 1.1.9

CATEGORIA	PUNTO DI INFIAMMABILITA'
A	$T < 21^{\circ}\text{C}$
B	$21^{\circ}\text{C} < T < 65^{\circ}\text{C}$
C	$65^{\circ}\text{C} < T < 125^{\circ}\text{C}$

Tabella 1.1.10

SOSTANZA	TEMPERATURA DI INFIAMMABILITA'	CATEGORIA
Gasolio	65	C
Acetone	-18	A
Benzina	-20	A
Alcool metilico	11	A
Alcool etilico	13	A
Toluolo	4	A
Olio lubrificante	149	

Gas infiammabili

I gas, generalmente contenuti in recipienti atti ad impedirne la dispersione incontrollata nell'ambiente, possono essere caratterizzati sia in funzione delle caratteristiche fisiche sia della modalità di conservazione.

La classificazione in funzione delle caratteristiche fisiche individua due categorie di gas:

- **Leggeri:** sono gas che una volta liberati dal proprio contenitore tendono a stratificare verso l'alto e che hanno una densità rispetto all'aria inferiore a 0.8.
- **Pesanti:** sono gas che liberati dal proprio contenitore tendono a stratificare e a permanere nella parte bassa dell'ambiente, ovvero a penetrare in cunicoli o aperture a livello del piano di calpestio. Presentano una densità rispetto all'aria superiore a 0,8.

In funzione delle modalità di conservazione si hanno invece le seguenti categorie di gas:

- **Compressi:** vengono conservati allo stato gassoso ad una pressione superiore a quella atmosferica in bombole o trasportati attraverso tubazioni. I valori indicativi della pressione di conservazione, detta pressione di stoccaggio, di alcuni gas compressi sono riportati nella Tabella 1.1.11.

Tabella 1.1.11

Gas	Pressione di stoccaggio [bar]
Metano	300
Idrogeno	250
Gas nobili	250
Ossigeno	250
Aria	250
CO ₂	20

- **Liquefatti:** sono gas che possono essere liquefatti a temperatura ambiente mediante compressione e includono: butano, propano, ammoniaca e cloro. Il loro vantaggio consiste nella possibilità di detenere grossi quantitativi di prodotto in spazi contenuti, ma i contenitori di gas liquefatto debbono garantire una parte del loro volume geometrico libera per garantire l'equilibrio di fase tra il liquido e il vapore.

- Refrigerati: sono gas che possono essere conservati in fase liquida mediante refrigerazione alla temperatura di equilibrio liquido vapore con livelli di pressione modesti molto vicini alla pressione atmosferica.
- Disciolti: sono gas conservati in fase gassosa disciolti entro un liquido ad una determinata pressione.

Dinamica dell'incendio

L'evoluzione dell'incendio prevede quattro fasi: ignizione, propagazione, incendio generalizzato ed estinzione e raffreddamento.

Ignizione

Durante la fase di ignizione di un incendio i vapori delle sostanze combustibili danno inizio al processo di combustione, processo ancora facilmente controllabile e legato ai seguenti fattori:

- Infiammabilità del combustibile.
- Possibilità di propagazione della fiamma.
- Grado di partecipazione al fuoco del combustibile.
- Geometria e volume degli ambienti.
- Possibilità di dissipazione del calore nel combustibile.
- Ventilazione dell'ambiente.
- Caratteristiche superficiali del combustibile.
- Distribuzione nel volume del combustibile, punti di contatto.

Propagazione

È una fase caratterizzata da basse temperature ed una scarsa quantità di combustibile coinvolta; il calore propaga l'incendio e si determina un lento innalzamento della temperatura, con emissione di fumi. Questa fase è caratterizzata dai fattori seguenti:

- Produzione di gas tossici e corrosivi;
- Riduzione di visibilità a causa dei fumi di combustione.
- Aumento della partecipazione alla combustione dei combustibili solidi e liquidi.
- Aumento rapido delle temperature.
- Aumento dell'energia di irraggiamento.

Incendio generalizzato o flash over

Il flash over è quella fase dell'incendio in cui tutto il materiale partecipa alla combustione che diviene così incontrollabile. È lo stadio in cui si ha il massimo rilascio di calore e si caratterizza per:

- Brusco incremento della temperatura.
- Crescita esponenziale della velocità di combustione.
- Forte incremento di emissioni di gas e di particelle incandescenti.
- Formazione di zone di turbolenza visibili.
- Autoaccensione dei combustibili vicini al focolaio.
- Riscaldamento e raggiungimento della temperatura di ignizione da parte dei combustibili lontani dal focolaio.

Estinzione e raffreddamento

La fase di estinzione avviene per esaurimento del combustibile e/o per soffocamento del comburente ed è seguita dal raffreddamento della zona interessata dall'incendio. La temperatura diminuisce a causa della progressiva diminuzione dell'apporto termico residuo e della dissipazione dell'energia termica attraverso i fumi.

Definizione e analisi del carico di incendio e del suo sviluppo nel tempo

Il carico totale di incendio è definito in base al contenuto calorifico dei materiali costituenti l'impianto e che possono partecipare al fenomeno della combustione.

L'approccio utilizzato per l'analisi dello sviluppo della combustione si basa sull'utilizzo delle velocità standard di crescita di rilascio energetico dell'incendio, su dati relativi al soddisfacimento dei requisiti associati a prove standard di comportamento al fuoco, su dati provenienti dal campo e cioè relativi ad eventi accaduti in passato, su dati sperimentali ottenuti da prove sui materiali/componenti effettivamente impiegati.

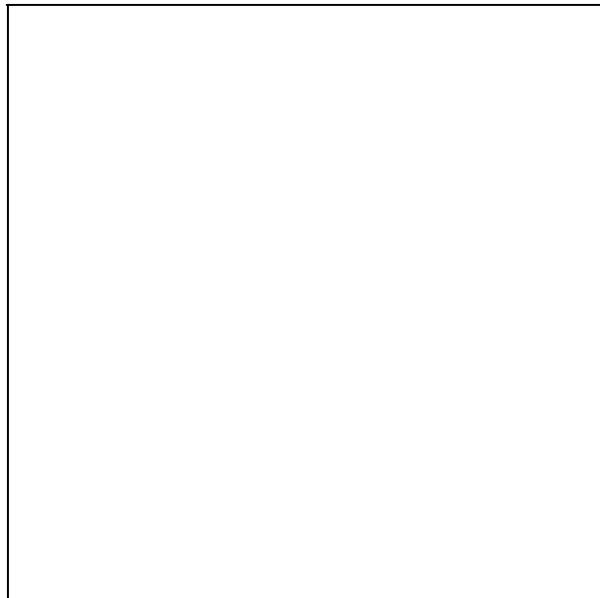
Merita attenzione in questo contesto il parametro HRR (*Heat Release Rate*), ovvero la velocità di rilascio dell'energia termica in grado di influenzare molte caratteristiche di un ambiente coinvolto in un incendio. Al suo aumentare, la temperatura e la sua velocità di crescita aumentano entrambi, accelerando lo sviluppo dell'incendio, mentre si ha una

riduzione della concentrazione di ossigeno e un incremento di prodotti gassosi e di particolato generato da una combustione incompleta.

Inoltre, la quantità di energia che un incendio è in grado di rilasciare è funzione del potere calorifico e dalla massa disponibile di combustibile.

Se si rappresenta su un piano la potenza termica rilasciata in funzione del tempo si ottiene la cosiddetta curva HRR¹ di seguito riportata (Figura 1.1.1):

Figura 1.1: curva HRR di un incendio



Essa rappresenta la curva della potenza termica sviluppata da un focolaio di incendio e utilizza di solito come unità di misura il kW ed il secondo.

Tali curve hanno di solito una fase di crescita quadratica e per evidenziare la dipendenza dal tempo al quadrato, sono chiamate anche at^2 . In base alla velocità di crescita sono classificate come:

- curve lente
- curve medie
- curve veloci
- curve ultraveloci

¹ www.antincendio.it

Le curve non crescono all'infinito, ma raggiungono un valore di picco e poi iniziano a decrescere. Pertanto, la parte quadratica della curva si riferisce solo alla fase iniziale. La fase di decadimento per i materiali più comuni occupa il 20-30% del tempo dell'intera fase di combustione. Così come per le durate, i valori di picco variano ovviamente dal materiale che brucia.

Quando un professionista deve simulare un incendio deve necessariamente individuare la curva di incendio da seguire per valutare l'evoluzione dell'incendio nell'ambiente, anche se non sempre è facilmente reperibile. In questi casi si deve costruire la curva di incendio, a partire dai dati e dalle esperienze a disposizione. Questa attività è molto complessa e può essere portata a termine solo se si dispongono di molte informazioni sul comportamento del materiale da esaminare e sull'origine dei dati con i quali si intende costruire la curva. In generale, date queste difficoltà, è meglio simulare un incendio che si propaga da un materiale noto ad un altro noto, piuttosto che sommare le curve di incendio in modo arbitrario. Questo processo può essere svolto utilizzando i software di simulazione dell'incendio, che in molti casi permettono di innescare in sequenza diversi materiali.

1.2 Principali cause d'incendio²

Le cause che possono dar luogo ad un incendio sono molte e talvolta anche ignote. Indicazioni sulla frequenza di accadimento delle stesse vengono date da rilevazioni statistiche sulla base delle quali quelle classificabili si distinguono in cause di origine elettrica, cause derivate da negligenze dei lavoratori, cause di origine termica di macchine o di impianti in generale, anomalie di funzionamento di macchine e impianti, azioni dolose.

Le cause più frequenti sono quelle di origine elettrica e sono dovute al surriscaldamento dei cavi di alimentazione elettrica, ad uno scorretto dimensionamento dell'impianto elettrico, al verificarsi di eventuali cortocircuiti, a scariche elettrostatiche anche di origine atmosferica, alla scorretta conservazione dello sto dei cavi di alimentazione degli utilizzatori, alla messa in tensioni, di impianti e parti di esso anche se non utilizzate, allo stato di conservazione delle prolunghe ed, infine, ad una manutenzione non conforme a

² ISPESL (istituto per la prevenzione e la sicurezza sul lavoro, servizio prevenzione e protezione, Dr. Arch.Marcello Tampone)

quanto prescritto o alla buona tecnica. Pertanto, un corretto dimensionamento e una verifica, nonché una manutenzione programmata degli impianti elettrici di distribuzione, di messa a terra e di protezione dalle scariche atmosferiche, così come un'appropriata manutenzione di tutti i componenti elettrici possono ridurre la probabilità di accadimento di eventi causa di incendi.

Le cause che scaturiscono da negligenze dei lavoratori si manifestano essenzialmente quando si depositano o manipolano scorrettamente sostanze infiammabili e facilmente combustibili, quando non vengono osservate le regole di prevenzione incendi, nell'utilizzo di stufette in aree dove non è consentito, nel deposito di materiali infiammabili in quantità difformi da quelle consentite, nello stoccaggio di prodotti infiammabili per la pulizia e l'igiene dei locali non adeguatamente custoditi, nell'utilizzo di prese volanti o multiprese non consentite o in condizioni non ottimali, nella mancata rimozione di materiali combustibili obsoleti abbandonati nei luoghi di lavoro (carta e materiali plastici per esempio) e nella manipolazione non corretta o non consentita di materiali infiammabili. In questo caso soltanto una verifica periodica dei luoghi di lavoro per evitare l'ingiustificato abbandono di materiali infiammabili o facilmente combustibili e per verificare il rispetto delle norme di prevenzione incendi e un'informazione sul pericolo d'incendio possono evitare l'innescarsi di eventi che causerebbero un incendio.

Cause di origine termica di macchine o impianti che possono facilmente essere evitate con verifiche e manutenzioni programmate degli impianti e delle macchine sono infatti dovute a surriscaldamento di parti di impianto, a carenza di manutenzione e lubrificazione, a mancato funzionamento di termostati e dispositivi di sicurezza correlati, ostruzione delle aperture di ventilazione dei macchinari.

Altre cause di incendio sono invece dovute ad anomalie di funzionamento di macchine ed impianti, come per esempio perdite di gas, liquidi o vapori infiammabili dovute a malfunzionamenti dei componenti delle apparecchiature, all'utilizzo non conforme di queste ultime, all'abbandono nelle loro vicinanze di materiali infiammabili, a carenze di manutenzione e al mancato funzionamento dei dispositivi di sicurezza e allarme. Cause queste che possono essere evitate attraverso la manutenzione programmata di tutti i componenti meccanici dell'impianto, l'osservanza delle modalità di utilizzo fornite dal costruttore, l'accertamento che l'area circostante l'impianto sia sgombra di materiali non permessi e, infine, la verifica degli impianti di sicurezza ed allarme.

1.3 Analisi del rischio incendio

Nell'ambito della sicurezza antincendio il rischio di ogni evento incidentale risulta definito da due fattori: la frequenza, ossia la probabilità che esso si verifichi in un determinato intervallo di tempo e la magnitudo, ossia l'entità delle possibili perdite e dei danni conseguenti al verificarsi dell'evento, come indicato dalla seguente formula:

$$***Rischio = Frequenza * Magnitudo***$$

da cui risulta evidente che quanto più si riducono la frequenza o la magnitudo, tanto più si ridurrà il rischio. Qualora si tratti di un rischio inaccettabile esso può essere controllato e gestito attraverso misure di tipo preventivo e protettivo adottate in modo complementare.

Precisamente con il termine prevenzione indichiamo l'insieme delle misure atte a ridurre la sola probabilità di accadimento, mentre con il termine protezione si indica l'insieme delle misure atte a ridurre la sola magnitudo dell'evento incendio e finalizzate a limitare gli effetti dell'incendio nello spazio e nel tempo. Quest'ultima comprende sia misure di tipo attivo che passivo, a seconda che venga richiesto o meno l'intervento di un operatore o di un impianto per essere attivate.

Ovviamente le azioni preventive e protettive non devono essere considerate alternative, ma complementari tra loro nel senso che, concorrendo al medesimo fine, devono essere intraprese entrambe, proprio per ottenere risultati ottimali.

Nella Tabella 1.2.1 è riportato il diagramma rappresentativo del controllo e della gestione del rischio di incendio inaccettabile. Nella Tabella 1.2.2 vengono indicate alcune misure di prevenzione e protezione incendi in dettaglio.

Tabella 1.2.1

PROBABILITA'			AREA DI RISCHIO INACCETTABILE	
Elevata				
MedioAlta		← Protezione		
MedioBassa			↓ Prevenzione	
Bassissima				
MAGNITUDO	Trascurabile	Modesta	Notevole	Ingente

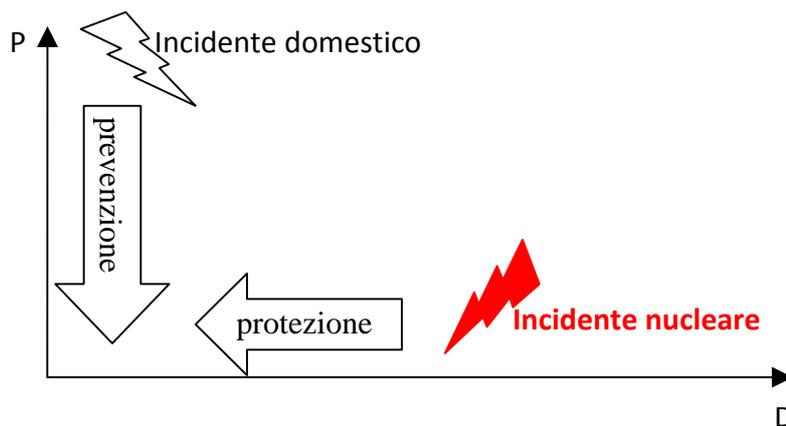
Tabella 1.2.2

PREVENZIONE INCENDI		
MISURE DI PREVENZIONE	Realizzazione di impianti elettrici a regola d'arte (norme CEI).	
	Collegamento elettrico a terra di impianti, strutture, serbatoi, etc.	
	Installazione di sistemi di protezione contro le scariche atmosferiche.	
	Dispositivi di sicurezza degli impianti di distribuzione ed utilizzazione di sostanze infiammabili	
	Ventilazione dei locali.	
	Utilizzo di materiali incombustibili.	
	Adozione di pavimenti e attrezzi antiscintilla.	
	Segnaletica di sicurezza.	
PROTEZIONE	PASSIVA	Strutture con caratteristiche di resistenza al fuoco commisurate ai carichi d'incendio.
		Materiali classificati per la reazione al fuoco
		Sistemi di ventilazione.
		Sistemi di vie d'uscita commisurate al massimo affollamento ipotizzabile dell'ambiente di lavoro e alla pericolosità delle attività svolte.
	ATTIVA	Estintori.
		Rete idrica antincendi.
		Impianti di rilevazione automatica d'incendio.
		Impianti di spegnimento automatici
		Dispositivi di segnalazione e d'allarme
		Evacuatori di fumo e calore.

Se si considera il rischio come funzione della probabilità (P) di accadimento dell'evento e del danno (D) conseguente all'evento incidentale, esso può essere visto come modello di una funzione continua regolato dall'espressione

$$\text{Rischio} = P * D$$

Dove P è il reciproco della frequenza di accadimento. Sul piano cartesiano DP è possibile pertanto visualizzare la posizione occupata dalle diverse tipologie incidentali.



L'analisi del rischio incendio prevede le cinque fasi di seguito riportate:

1. Comprensione di cosa potrebbe accadere, ossia identificazione degli incidenti che potrebbero verificarsi in una data installazione o attività lavorativa, in funzione delle caratteristiche del sito, del tipo di processo, delle sostanze presenti sia in lavorazione che in deposito. A tale fine è necessario individuare le criticità dell'evento, ovvero i pericoli di incendio³ e le persone ed i beni potenzialmente esposti al pericolo. Successivamente fare un'analisi della possibile magnitudo dell'evento, soprattutto per quelle attività esposte a un numero abbastanza grande di persone ed analizzare le possibili sorgenti di innesco, legate al particolare processo produttivo, all'utilizzo delle fiamme libere, allo sviluppo di calore per attrito, alla presenza di attrezzature elettriche non installate a regola d'arte, all'accumulo di cariche elettrostatiche specie in ambienti ove si formano polveri, alla presenza di atmosfere esplosive per presenza di gas infiammabili ed, infine, alle omesse misure precauzionali di esercizio. La determinazione dei possibili incidenti si avvale di diversi metodi come il metodo storico-statistico, interviste a operatori e sopralluoghi sugli impianti, check list, manuali operativi e standards impiantistici ed, infine, metodi analitici come l'HAZOP (Hazard and Operability analysis) e la FMEA (Failure Modes and Effects Analysis).

³ Pericolo d'incendio: proprietà intrinseca del materiale o di un processo lavorativo di determinare in talune condizioni, un incendio.

2. Determinazione del momento di accadimento dell'evento, ossia stima della frequenza di accadimento degli incidenti che si possono verificare in una data installazione o attività sportiva, attraverso metodi che prevedono analisi storico-statistiche, alberi dei guasti e degli eventi. La frequenza di accadimento viene valutata come "occasioni incendio/unità di tempo", in cui le occasioni di incendio sono fornite direttamente dai pericoli d'incendio.
3. Determinazione di cosa l'evento possa comportare, ovvero stima dell'entità dei danni a persone o a cose legata al verificarsi dell'incidente, individuando le aree di potenziale pericolo e stimando danni conseguenti all'uomo e all'ambiente, in funzione delle persone potenzialmente esposte e delle strutture ed impianti presenti nell'area di potenziale pericolo. L'entità del danno è misurata in termini feriti e morti e in perdite economiche per danni materiali. Nella stima dei danni alle persone è importante l'analisi degli effetti dell'incendio sull'uomo determinati dai prodotti della combustione, come anossia, azione tossica dei fumi, riduzione della visibilità, azione termica.
4. Stabilire la soglia di accettabilità del rischio, in quanto il livello di accettabilità non rappresenta un dato fisso, ma è in relazione ad una serie di condizioni esterne che caratterizzano l'installazione e il suo contesto.
5. Determinare le tipologie di misure preventive e protettive qualora il rischio non risulti accettabile.

Identificati i fattori di rischio e le persone esposte, eliminata o ridotta la probabilità di accadimento dell'evento e il possibile danno conseguente, si stima, in conformità alla vigente normativa o in sua assenza nella misura del possibile, il livello di rischio residuo e si predispone pertanto un programma organizzativo gestionale per il controllo e il miglioramento della sicurezza.

In materia di sicurezza contro gli incendi per le installazioni nucleari è prevista la redazione del cosiddetto "Programma di prevenzione e protezione incendi" che è un documento organico sulla sicurezza antincendio che descrive i principi generali ed i requisiti di progetto delle misure che vengono messe in atto per fronteggiare le problematiche inerenti l'incendio.

Come già scritto nella Prefazione, in Italia l'attività nucleare oggi è essenzialmente collegata alla disattivazione e allo smantellamento delle installazioni presenti sul territorio nazionale. In questo ambito il programma di prevenzione e protezione incendi contiene l'individuazione dei pericoli d'incendio, la valutazione qualitativa del rischio d'incendio, la descrizione delle condizioni ambientali e delle misure antincendio messe in atto per compensare il rischio di incendio, i controlli amministrativi e la gestione dell'emergenza associati a ciascuna attività rilevante della disattivazione e alle conseguenti configurazioni che volta per volta si verranno a creare; il programma fornisce inoltre le linee guida attraverso le quali devono essere redatti i documenti di dettaglio contenenti la valutazione quantitativa del rischio incendio (VRI o *fire hazard analysis*, FHA) relativamente ad ogni attività.

Questo programma viene redatto secondo la struttura dettata dalla normativa nazionale, con particolare riferimento al Decreto Ministeriale del 4 maggio 1998, e da standard internazionali, quali NFPA 801 e Regulatory guide 1.191.

Nell'ambito di attività preliminari alla disattivazione di alcuni impianti, gli organi competenti hanno individuato i principali contenuti del programma; in particolare:

- contiene le linee guida su come eseguire la FHA che deve essere effettuata per ogni attività rilevante nell'ambito della disattivazione al fine di stabilire le necessarie misure di prevenzione e protezione antincendio da mettere in atto. Gli aspetti contenuti nella valutazione sono i seguenti:
 - individuazione dei pericoli di incendio.
 - Descrizione delle condizioni ambientali.
 - Valutazione del rischio di incendio e dei pericoli radiologici.
 - Individuazione delle misure antincendio: sistemi di rivelazione, compartimentazione, sistemi di spegnimento fissi, automatici e mobili, attrezzature di intervento antincendio.
- Fornisce un quadro dei controlli amministrativi che dovranno essere messi in atto e che comprendono le norme di esercizio, i regolamenti e l'insieme delle procedure

attraverso i quali si assicura il perseguimento degli obiettivi di sicurezza antincendio, ovvero:

- Organizzazione della centrale e del personale.
 - Procedure antincendio.
 - Formazione e addestramento.
 - Fire watch.
 - Controllo dei materiali combustibili e dei carichi di fuoco.
 - Controllo delle sorgenti di innesco.
 - Controllo dei sistemi antincendio.
- Individua le modalità per la gestione dell'emergenza, la quale si articola in procedure che vanno verificate di volta in volta a fronte delle esigenze derivanti dalle nuove configurazioni delle aree e del personale. Viene considerata sia l'emergenza di tipo nucleare che quella convenzionale.

Inoltre il programma di protezione incendi chiarisce che la valutazione di rischio da incendio dovrà essere corredata di elaborati grafici riportanti le eventuali compartimentazioni, le zone dove si svolgono le attività ed ogni altra misura messa in atto per perseguire gli obiettivi di riduzione del rischio incendio.

Capitolo 2

Strategie e metodologie per l'analisi degli scenari di incendio

2.1 strategie di prevenzione incendi⁴

Le strategie di prevenzione incendi possono essere classificate in due categorie, quelle che seguono un approccio di tipo deterministico e quelle che si avvalgono di un approccio di tipo ingegneristico- prestazionale.

L'approccio deterministico, prevalente in Italia, è una strategia di prevenzione incendi basata sull'emanazione di norme estremamente prescrittive e talvolta sull'utilizzo di strumenti di calcolo molto semplici.

Esso definisce le regole di tipo generale per categorie di edifici o sistemi che sono caratterizzati da una certa omogeneità; seguendo tali regole si può supporre sia garantita la sicurezza del sistema.

L'estrema semplicità, l'omogeneità di applicazione e la possibile formazione uniforme e accettabile dei controllori in tempi ragionevoli compensano la scarsa flessibilità dell'approccio dovuta a prescrizioni normative e procedure di calcolo estremamente rigide.

L'approccio ingegneristico- prestazionale è orientato a definire criteri e regole specifiche per quei sistemi e contesti difficilmente assimilabili in categorie omogenee per le quali ogni caso richiede uno studio ed un approccio ad hoc.

Per approccio prestazionale alla sicurezza antincendio si intende l'analisi del contesto specifico, volto a dimostrare il raggiungimento dell'obiettivo di sicurezza sulla base delle caratteristiche proprie del sistema oggetto dello studio e del suo comportamento, in caso di incendio. Questa necessità è sentita in particolar modo nei riguardi degli edifici caratterizzati da forte singolarità, come quelli di interesse storico artistico o dei grandi progetti, in cui è più probabile che si manifesti l'impossibilità di ottemperare

⁴ Fire safety engineering: un'applicazione, ministero dell'interno

completamente alle norme prescrittive o per i quali una norma prescrittiva di riferimento non sia disponibile⁵.

È un metodo che mira a prevedere la dinamica evolutiva dell'incendio attraverso l'applicazione di modelli di calcolo fisicamente basati. Sussistono, tuttavia, delle difficoltà evidenti nell'applicazione dei metodi prestazionali, dovute principalmente alle carenze nella normativa specifica, soprattutto in Italia e in Europa e alla necessità di approfondire la definizione della metodologia che porta al riconoscimento della congruità del progetto antincendio. Fermo restando la necessità di ottemperare scrupolosamente a tutti i passi della procedura prestazionale è innegabile come un punto cruciale della stessa sia la scelta e la modellazione degli scenari di incendio al fine di verificare la capacità di soddisfare i requisiti di sicurezza, da parte del progetto proposto.

L'estrema flessibilità dell'approccio consente l'analisi di incendi di notevole complessità, pur prevedendo l'assegnazione, più o meno raffinata a seconda del modello, di dati di input, quali geometria del dominio di calcolo, condizioni di ventilazione, tipo e quantità di combustibile, curva HRR nel tempo.

Per converso questo approccio presenta la problematica della sua validazione sperimentale data la natura distruttiva delle prove che andrebbero condotte a tal fine e un onere computazionale non sempre sostenibile con la tecnologia informatica esistente.

Attualmente l'approccio ingegneristico- prestazionale, detto anche *Fire Engineering*, in Italia è utilizzato per quelle casistiche per cui non esistono specifiche norme prescrittive, come le attività a rischio di incidente rilevante e la *fire investigation*.

L'idea di studiare la dinamica di un incendio per via numerica risale agli inizi dell'era dei computer, anche se le equazioni di conservazione che regolano la dinamica dei fluidi, il trasferimento di calore e la combustione risalgono a più di un secolo fa. l'utilizzo invece di un modello per studiare gli scenari di incendio e comprenderne le evoluzioni è piuttosto recente a causa della complessità dell'evento in esame.

Le difficoltà che si incontrano nell'analisi della dinamica di un incendio sono varie, ma sintetizzabili essenzialmente problemi come segue:

⁵ Approccio prestazionale alla sicurezza antincendio in edifici di interesse storico-artistico: il caso di Santa Maria della scala in Siena, quaderni scienza e tecnica, Gabriiele Ballocco, Andrea Carpignano, Luca Nassi.

1. Esiste un numero molto elevato di scenari di incendio possibili a causa della natura accidentale dell'evento.
2. Le potenze di calcolo richieste sono insufficienti rispetto la fenomeno da modellare.
3. Il combustibile nella maggioranza delle situazioni incidentali non è mai considerato tale; i modelli matematici ed i dati necessari a caratterizzare il degrado dei combustibili solidi o liquidi non sono disponibili, mentre i modelli matematici delle trasformazioni dei combustibili durante un incendio sono ancora agli albori.

Per questi motivi le situazioni analizzate sono molto approssimate e semplificate e invece di cercare una metodologia da applicare a tutti gli scenari di incendio, l'approccio seguito nello studio della dinamica di un incendio consiste nell'analizzare situazioni che sembrano essere più semplici da analizzare per poi generalizzarle e giungere all'analisi di situazioni più complesse, con miglioramenti sistematici, anche in funzione delle crescenti potenze di calcolo. Gli approcci di simulazione della prevenzione incendi emersi finora trattano l'incendio come un processo tridimensionale a se stante che evolve nel tempo⁶.

Nei paragrafi seguenti sarà data una descrizione degli stessi e, successivamente, sarà analizzato nel dettaglio il modello FDS utilizzato per l'analisi dello scenario d'incendio considerato.

2.2 L'utilizzo dei modelli di simulazione nell'ambito dell'ingegneria antincendio: la Fire Engineering⁷

Per prevedere la dinamica evolutiva e gli effetti di un incendio è possibile utilizzare un'ampia varietà di strumenti di calcolo, di non sempre facile applicazione, se si considera la specificità e la complessità dell'evento incendio e, quindi, il margine di incertezza talvolta considerevole associato ai risultati forniti dal modello.

I modelli attualmente utilizzati possono essere classificati in tre categorie⁸:

⁶ SIST Special Publication 1018, Fire Dynamics Simulator, (Version 4), Technical Reference Guide, Kevin McGrattan, Editor

⁷ Quaderni di scienza e tecnica, l'utilizzo dei modelli di simulazione nell'ambito dell'ingegneria antincendio. Fire safety engineering, un'applicazione, ministero dell'interno.

- modelli mono-zona
- modelli a zone
- modelli fluidodinamici

Modelli mono-zona

I modelli mono-zona si caratterizzano per il considerare il locale in cui si sviluppa l'incendio come un'unica zona in cui i valori delle grandezze significative dell'evento, come per esempio la temperatura, sono uguali in ogni punto. Si utilizzano nel campo dell'ingegneria strutturale soprattutto per predire condizioni di post- flashover in un singolo compartimento, in quanto non forniscono una buona approssimazione delle prime fasi dell'incendio.

Modelli a zone

A differenza dei precedenti, i modelli a zone, detti anche a **parametri concentrati** o parametrici, risolvono in modo esatto un'equazione o un set di equazioni in cui compaiono la conservazione della quantità di moto, dell'energia e della materia, equazioni algebriche nello stato stazionario e differenziali nello stato transitorio.

Descrivono incendi di compartimento, ciascuno dei quali è suddiviso in due volumi (*layer*), uno strato superiore caldo e uno strato inferiore più freddo, omogenei nello spazio, ossia tali che i valori assunti dalle grandezze intensive pressione, temperatura e concentrazione della specie, siano considerati uniformi all'interno di ciascun *layer*. Per ciascuno dei *layer* sono realizzati gli equilibri di massa ed energia, ai quali sono affiancati modelli ulteriori che descrivono altri processi fisici che caratterizzano l'evento in esame, come per esempio trasferimenti radiativi e convettivi di calore, flussi attraverso porte, etc.

L'output standard fornito dal modello è rappresentato dal valore delle proprietà intensive allo stato stazionario e dai loro profili temporali.

La semplicità fisica e computazionale del modello dei modelli a zone è responsabile dell'ampia diffusione che gli stessi hanno trovato nell'analisi degli scenari di incendio.

⁸ Lundin J, Uncertainty in smoke transport models, Report 3086, Lund University, Department of fire Safety engineering, Lund(Norway), 1997.

pertanto finché l'analisi dello scenario non richieda come parametro di input la descrizione dettagliata della distribuzione spaziale delle proprietà fisiche relative e la descrizione del compartimento attraverso i due *layer* approssimi la realtà ragionevolmente, questi modelli possono essere considerati attendibili.

Modelli fluidodinamici

La crescita rapida delle potenze di calcolo e la maturità raggiunta dalla CFD (*Computational Fluid Dynamics*) sono state responsabili della nascita e diffusione dei modelli fluidodinamici, conosciuti anche come modelli a **parametri distribuiti** (o numerici o di campo), che forniscono la dinamica evolutiva di un incendio in uno spazio per via numerica, ossia risolvendo in modo approssimato un set di equazioni di conservazione esatte che caratterizzano l'evento.

Richiedono la descrizione dettagliata del compartimento e delle aperture, ma consentono anche la simulazione di spazi non compartimentati, come i “*plume*”⁹ e i camini.

Tra questi, i modelli numerici euleriani implementati in software commerciali di fluidodinamica computazionale (CFD) costituiscono di gran lunga la più raffinata possibilità di simulazione di incendio attualmente disponibile.

La fluidodinamica computazionale si basa sull'integrazione numerica delle equazioni differenziali che modellano i bilanci accoppiati di quantità di moto, materia ed energia e consente di pervenire al calcolo dei campi vettoriali di velocità ed ai campi scalari di temperatura e concentrazione.

I vantaggi offerti dalla CFD risiedono nella sue caratteristiche di estrema flessibilità e di possibilità di modellare i flussi turbolenti con estrema raffinatezza qualora siano simulati incendi non confinati, confinati e semi-confinati, seguiti da propagazione e dispersione dei prodotti della combustione.

La caratteristica di flessibilità dello strumento consente di modellare qualsivoglia fenomeno di trasporto in ambiti molto diversi tra loro e di trattare geometrie molto complesse, descrivendole, dettagliatamente attraverso la realizzazione di griglie flessibili e particolareggiate e l'imposizione di condizioni al contorno specifiche e diverse.

⁹ Plume: pennacchio di fiamme e gas caldi che si eleva dalla regione di combustione

La CFD presenta tuttavia lo svantaggio di richiedere un onere computazionale molto maggiore rispetto agli altri modelli conosciuti ed è per questo motivo che si è diffusa maggiormente negli ultimi anni grazie all'avvento di tecnologie sempre più potenti.

I codici CFD sono strutturati solitamente in tre parti: pre-processore, solutore e post-processore, deputati ad eseguire tre fasi distinte della simulazione. Precisamente:

- il **pre-processore** permette di descrivere geometricamente il dominio di integrazione, di realizzarne una discretizzazione spaziale attraverso la generazione di una griglia adeguata e specificarne la tipologia delle condizioni di frontiera.
- Il **solutore** importa il dominio generato dal pre-processore, assegna le condizioni iniziali e quelle al contorno, esegue tutte le residue scelte, modellistiche e numeriche, in modo da definire correttamente il problema ed, infine, integra numericamente le equazioni accoppiate di trasporto, approssimando numericamente le variabili di flusso incognite, discretizzando nel tempo e nello spazio le equazioni in argomento e risolvendo, infine, il sistema di equazioni algebriche ottenuto.
- Il post-processore permette di visualizzare ed elaborare i risultati ottenuti dal solutore, visualizzando per esempio la geometria del dominio di integrazione.

Nel caso specifico di applicazione della CFD alla predizione della dinamica evolutiva dell'incendio, i dati di input da assegnare sono la geometria del dominio di integrazione, la tipologia di materiali costituenti la frontiera del dominio e i parametri caratteristici della curva HRR nel tempo. Le proprietà di trasporto dei materiali di cui è costituita la frontiera del compartimento sono determinanti per la valutazione della quantità di dispersione termica.

2.2.1 Fire Dynamics Simulator

Il FDS (*Fire Dynamics Simulator*)¹⁰ è un modello di fluidodinamica computazionale che risolve numericamente una forma delle equazioni di Navier Stokes idonee alla descrizione di flussi a basse velocità, guidati dalla temperatura, enfatizzando il trasporto di fumi e

¹⁰ NIST Special Publication 1018, Fire Dynamics Simulator (Version4) Technical Reference Guide, Kevin MCGrattan, Editor, NIST.

calore da parte dell'incendio. In esso le derivate parziali delle equazioni di conservazione della massa, del momento e dell'energia sono approssimate in termini di differenze finite e la soluzione viene aggiornata nel tempo su griglia tridimensionale rettilinea. La radiazione termica è analizzata e calcolata utilizzando la tecnica a volumi finiti sulla stessa griglia di risoluzione dei flussi.

Il modello è stato sviluppato dalla divisione di ricerca sugli incendi del BFRL (Building and Fire Research Laboratory) del NIST (National Institute of Standards and Technology) con i contributi di altri enti e viene utilizzato per diversi scopi nell'ambito della protezione ingegneristica dagli incendi, tra cui:

- Trasporto a basse velocità dei prodotti della combustione e dal calore da parte dell'incendio.
- Trasferimenti radiativi e convettivi tra gas e superfici solide.
- Pirolisi.
- Crescita dell'incendio e diffusione della fiamma.
- Attivazione degli sprinkler, dei rilevatori di calore e di quelli del fumo.

Sebbene l'FDS sia stato progettato specificatamente per simulare scenari di incendio, esso può tuttavia essere utilizzato per analizzare il comportamento di flussi di fluido a basse velocità che non necessariamente includono fuoco ed effetti termici.

Il modello è in grado di calcolare temperatura, pressione, velocità e composizione chimica entro ogni cella della griglia numerica a ciascun passo di tempo discreto. Inoltre calcola la temperatura, il flusso di calore, la velocità di perdita di massa e varie altre quantità sulle superfici solide del compartimento in esame.

Output tipici per la fase gassosa sono:

- Temperatura del gas.
- Velocità del gas.
- Concentrazione delle diverse specie nei gas.

- Concentrazione dei fumi e stima della visibilità.
- Pressione.
- Velocità di rilascio di calore per unità di volume (HRRPUV).
- Rapporto aria-combustibile (Mixture fraction).
- Densità del gas
- Massa delle gocce d'acqua per unità di volume.

Sulle superfici solide il modello predice quantità aggiuntive associate con gli equilibri di energia esistenti tra fasi solida e gassosa, come:

- Temperatura interna e superficiale.
- Flussi di calore radiativo e convettivo.
- Velocità di combustione.
- Massa delle gocce d'acqua per unità di area.

Le quantità globali registrate dal programma sono:

- Velocità di rilascio di calore globale (HRR).
- Tempo di attivazione degli sprinkler e dei rivelatori.
- Flussi di massa e di energia attraverso aperture e superfici.

I modelli idrodinamico e di combustione caratteristici del FDS sono descritti di seguito.

Modello idrodinamico

FDS risolve numericamente una forma approssimata delle equazioni di Navier- Stokes adeguate a descrivere applicazioni caratterizzate da valori bassi del Mach number, approssimazione che permette di filtrare le onde acustiche e di analizzare grandi variazioni di temperatura e di densità. L'aspetto computazionale può essere affrontato sia con la

simulazione DNS (Direct Numerical Simulation) che con quella LES (Large Eddy Simulation).

La base del modello è costituita dalle equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia di un fluido newtoniano¹¹ e dall'equazione di stato di un gas perfetto, che danno luogo a un insieme di equazioni differenziali alle derivate parziali in sei incognite, funzioni delle tre dimensioni spaziali e del tempo: la densità ρ , le tre componenti della velocità $\mathbf{u}(u,v,w)$, la temperatura T, e la pressione p.

Equazione di conservazione della massa

Si presenta nella forma

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0$$

ed è spesso scritta in termini di frazioni della massa delle singole specie gassose coinvolte:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho \mathbf{D}_i \nabla Y_i + \dot{m}_i'''$$

con:

Y_i : frazione di massa della specie gassosa.

Y_i : frazione di massa della specie gassosa.

\dot{m}_i''' : velocità di consumo o produzione della massa;

$$\sum Y_i = 1$$

$$\sum \dot{m}_i''' = 0$$

$$\sum \rho \mathbf{D}_i \nabla Y_i = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto (o seconda legge di Newton)

¹¹ Fluido newtoniano: fluido in cui la viscosità è indipendente dalla velocità con cui viene misurata e, pertanto, caratterizzati da un legame di diretta proporzionalità tra il tensore degli sforzi viscosi e il tensore delle velocità di deformazione.

Si presenta nella forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij}$$

in cui $\mathbf{u} \mathbf{u}$ è la matrice 3×3 ottenuta moltiplicando i vettori \mathbf{u} e \mathbf{u}^T , mentre il termine $\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u}$ è il vettore ottenuto applicando l'operatore vettoriale gradiente $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z} \right)$ al tensore dato. Inoltre termine \mathbf{f} è indicativo dell'insieme delle forze che agiscono sul fluido, inclusa la forza di gravità, mentre il tensore dello stress viscoso è così definito:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right)$$

con

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} ; S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i, j = 1, 2, 3$$

Equazione di conservazione dell'energia (prima legge della termodinamica)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + q''' - \nabla \cdot \mathbf{q} + \Phi$$

Con h si identifica l'entalpia del fluido, funzione della temperatura e del calore specifico a pressione costante c_p :

$$h = \int_{T_0}^T c_p(T') dT'$$

mentre Φ è un termine dissipativo (funzione dissipativa) così definito:

$$\Phi \equiv \boldsymbol{\tau}_{ij} \cdot \nabla \mathbf{u} \equiv \mu \left(2\mathbf{S}_{ij} \cdot \mathbf{S}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right) \equiv \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

e solitamente trascurabile in quanto molto minore dell'HRR del fuoco.

Equazione di stato di un gas perfetto

$$p = \frac{\rho R T}{M}$$

Ai fini delle applicazioni ingegneristiche il modello adotta le ipotesi secondo cui il fluido è considerato un gas perfetto, lo stress viscoso è legato allo sforzo attraverso una relazione di lineare dipendenza e, infine, la trasmissione di calore per conduzione rispetta la legge di Fourier.

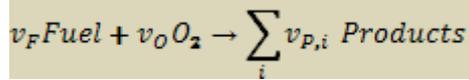
Modello di combustione

Sono due i modelli di combustione utilizzati da FDS in funzione della tipologia di simulazione utilizzata. Nel caso di simulazione del tipo DNS, dove il fenomeno di diffusione può essere modellato direttamente, il modello è basato su una reazione chimica ad unico step e a velocità finita; viceversa nel caso di applicazione della LES, dove la griglia di calcolo non è abbastanza fine ai fini della risoluzione dei fenomeni di diffusione del combustibile e dell'ossigeno, il modello si basa sulla cosiddetta frazione di miscela (*mixture fraction combustion*). Per la maggior parte delle applicazioni è questo il modello utilizzato da FDS.

La *mixture fraction combustion* si basa sull'assunzione secondo cui i fenomeni di trasporto radiativo e convettivo su larga scala sono simulati direttamente, mentre i processi fisici che si verificano su piccole scale di lunghezze e tempi sono rappresentati in modo approssimato. Inoltre la combustione è controllata in fase di miscelazione (*mixing-controlled*) e la reazione del combustibile e dell'ossigeno è infinitamente veloce, indipendentemente dalla temperatura. Ciò implica che tutte le specie coinvolte possono essere descritte in termini di *mixture fraction* $Z(\mathbf{x},t)$.

La *mixture fraction* è una quantità scalare conservativa definita come la frazione di materiale in un punto dato nel campo di flusso che si origina nel flusso di combustibile; le relazioni tra la frazione di massa di ciascuna specie e la *mixture fraction* sono note come relazioni di stato. La relazione di stato per la frazione di massa di ossigeno fornisce le informazioni necessarie a calcolare la velocità di consumo locale dello stesso. In questo modo la velocità di rilascio di calore locale è calcolata a partire dalla velocità di consumo locale di ossigeno sulla superficie della fiamma, ipotizzando che la velocità di rilascio di calore sia direttamente proporzionale alla velocità di consumo dell'ossigeno, indipendentemente dalla tipologia di combustibile coinvolto.

La forma generale della reazione di combustione è la seguente:



Dove i v_i rappresentano i coefficienti stechiometrici della reazione di combustione di ossigeno e combustibile necessari a produrre un certo numero di prodotti P.

Questa equazione implica che le velocità di consumo del combustibile e dell'ossigeno sono nella relazione:

$$\frac{\dot{m}_F'''}{v_F M_F} = \frac{\dot{m}_O'''}{v_O M_O}$$

La *mixture fraction* è allora così definita:

$$Z = \frac{sY_F - (Y_O - Y_O^\infty)}{sY_F^I + Y_O^\infty}$$

con $s = \frac{v_O M_O}{v_F M_F}$ e può assumere valori da 0, nella regione contenente soltanto combustibile, a 1, dove la frazione di massa dell'ossigeno assume il suo massimo (Y_O^∞), mentre quella del combustibile è nulla. Il termine Y_F^I rappresenta la frazione del combustibile nel flusso dello stesso. Le quantità M_F ed M_O rappresentano, rispettivamente, i pesi molecolari del combustibile e dell'ossigeno. Inoltre la mixture fraction soddisfa la legge di conservazione

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \nabla Z$$

ottenuta dalla combinazione lineare delle equazioni di conservazione per il combustibile e l'ossigeno.

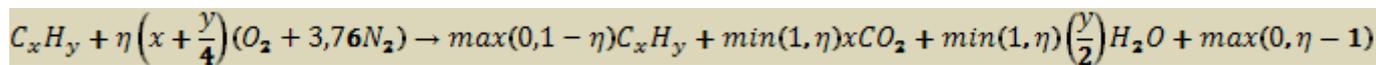
FDS lavora ipotizzando che la velocità delle reazioni che portano al consumo di combustibile e ossigeno siano così veloci che non si può avere coesistenza tra combustibile e ossigeno. La richiesta per cui combustibile e ossigeno scompaiano in modo simultaneo definisce una superficie di fiamma $Z(\mathbf{x}, t) = Z_f$ con:

$$Z_f = \frac{Y_O^\infty}{sY_F^I + Y_O^\infty}$$

L'ipotesi secondo cui combustibile e comburente non debbano coesistere porta alla definizione di una "relazione di stato", tra la frazione di massa dell'ossigeno e la *mixture fraction*:

$$Y_O(Z) = \begin{cases} Y_O^{\infty} \left(1 - \frac{Z}{Z_f}\right), & Z < Z_f \\ 0, & Z > Z_f \end{cases}$$

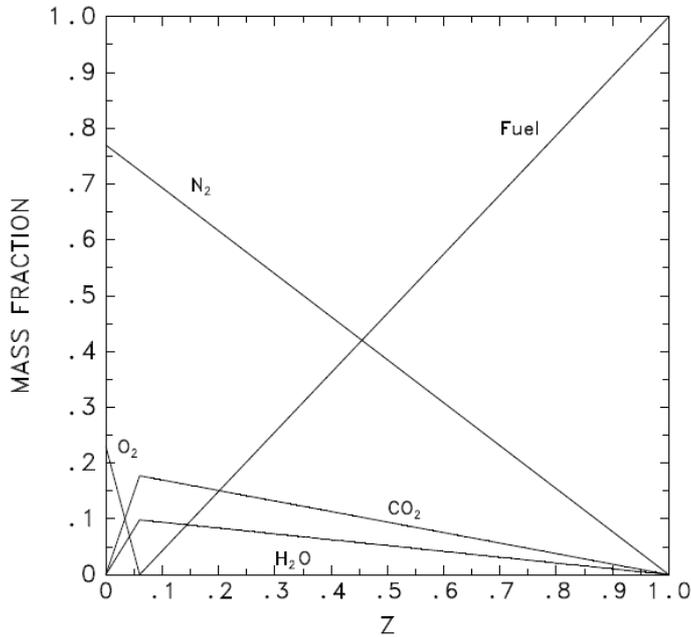
Le relazioni di stato per i reagenti e i prodotti può essere derivata considerando la reazione ideale di un idrocarburo:



Dove η è un parametro che varia da 0, nella situazione in cui si ha quantità massima di combustibile e quantità nulla di ossigeno, e 1, quando si ha quantità massima di ossigeno ed assenza di combustibile.

Nella Figura 2.2.1 si riporta il diagramma delle relazioni di stato per il propano:

Figura 2.2.1: relazioni di stato per il propano



dove sull'asse delle ascisse sono riportati i valori di Z , mentre sull'asse delle ordinate i valori delle frazioni di massa. È possibile, inoltre, notare come in corrispondenza del valore $Z = Z_f$ le frazioni di massa dell'ossigeno e del propano si annullino simultaneamente, come precedentemente detto.

L'espressione dell'HRR locale è dedotta dalle equazioni di conservazione e la relazione di stato dell'ossigeno. Il punto di partenza della stessa è la relazione di Hugget secondo cui il rateo di rilascio di calore è una funzione di quello di consumo dell'ossigeno:

$$\dot{q}''' = \Delta H_O \dot{m}_O'''$$

in cui ΔH_O rappresenta il rateo di rilascio di calore per unità di massa di ossigeno consumato.

L'equazione di conservazione della massa per l'ossigeno così espressa:

$$\rho \frac{DY_O}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \nabla Y_O + \dot{m}_O'''$$

Può essere trasformata in un'espressione per il rateo di rilascio locale di calore usando l'equazione di conservazione per la mixture fraction e la relazione di stato per l'ossigeno $Y_o(Z)$ nel seguente modo:

$$-\dot{m}_o'' = \nabla \cdot \left(\rho D \frac{dY_o}{dZ} \nabla Z \right) - \frac{dY_o}{dZ} \nabla \cdot \rho \mathbf{D} \nabla Z = \rho D \frac{d^2 Y_o}{dZ^2} |\nabla Z|^2$$

Nessuna delle due espressioni è conveniente ai fini del calcolo numerico del rateo di consumo locale di ossigeno a causa della discontinuità della derivata di $Y_o(Z)$ nel punto $Z = Z_f$. Pertanto si ricorre a un'ulteriore formula che permette di calcolare il rateo di consumo di ossigeno per unità di area sulla superficie di fiamma e che si ottiene integrando \dot{m}_o'' su un piccolo volume individuato dalla superficie della fiamma.

$$-\dot{m}_o'' = \left. \frac{dY_o}{dZ} \right|_{z < z_f} \rho D \nabla Z \cdot \mathbf{n}$$

Capitolo 3

Simulazioni di incendio con il codice FDS

Considerati alcuni aspetti teorici del codice FDS, il lavoro di stage si è focalizzato sull'applicazione del software a semplici casi studio. La metodologia seguita per ciascuno di essi si è articolata in tre fasi: modellazione del caso, lettura e analisi dei risultati ottenuti, visualizzazione grafica degli output della simulazione. La versione di FDS utilizzata a tal scopo è la numero quattro realizzata nel marzo 2006.

La modellazione di un evento derivante dallo sviluppo di un incendio è realizzata attraverso due file di testo: il file di dati (casename.data), che fornisce al codice tutte le informazioni necessarie a studiare il fenomeno in esame, e il file (database) che contiene parametri che descrivono i materiali specifici e i dispositivi utilizzati nel file di dati.

I dati di input si impostano scrivendo il file di testo che contiene delle parole chiave formattate (NAMELIST) per essere utilizzate dal codice scritto in Fortran. Ogni linea deve essere preceduta dal carattere "&" seguito dal nome del gruppo di NAMELIST e contenere una lista di parametri che corrispondono al dato gruppo. Ogni lista termina con il carattere "/". La simulazione viene lanciata in ambiente Windows aprendo una sessione del prompt del DOS . Al termine della simulazione i dati sono forniti attraverso file excel, ma è possibile visualizzare le predizioni numeriche generate da FDS attraverso lo strumento di visualizzazione grafica Smokeview.

FDS e Smokeview sono solitamente usati entrambi per modellare e visualizzare lo scenario di incendio.

Quest'ultimo, in particolare, solitamente usato dopo che il processore ha terminato il calcolo numerico, può essere utile anche durante la simulazione per monitorarne i progressi o in fase iniziale per fissare i dati di input di FDS più velocemente.

Se Smokeview viene utilizzato dopo la simulazione con FDS, per richiamarlo è sufficiente fare un doppio click sul file casename.smv oppure scrivere smokeview casename nella linea di comando.

Quanto detto verrà presentato nei seguenti paragrafi in cui si modellano e analizzano due casi studi generici, denominati caso studio generico 1 e caso studio generico 2, ai fini di una comprensione della modalità di applicazione del codice.

3.1 Caso studio generico 1

L'obiettivo di questo caso studio è di modellare un primo e semplice scenario di incendio, incendio singolo da pozza di carburante in un locale chiuso, descrivendo le diverse fasi seguite e i diversi comandi utilizzati. La prima fase del lavoro consiste nell'impostare il seguente file d input:

```
&HEAD CHID='caso_studio',TITLE='Incendio singolo da pozza di carburante in locale chiuso' /
&GRID IBAR=24,JBAR=24,KBAR=12 /
&PDIM XBAR0=-.30,XBAR=0.30,YBAR0=-.30,YBAR=0.30,ZBAR=0.3 /
&TIME TWFIN=20. /
&SURF ID='burner', HRRPUA=1000. /
&OBST XB=-.20,0.20,-.20,0.20,0.00,0.05, SURF_IDS='burner','INERT','INERT' /
&VENT CB='XBAR' /
&VENT CB='XBAR0' /
&VENT CB='YBAR' /
&VENT CB='YBAR0' /
&VENT CB='ZBAR' /
&SLCF PBX=0.,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY=0.,QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBZ=0.,QUANTITY='MIXTURE_FRACTION' /
&BNDF QUANTITY='HEAT_FLUX' /
```

Gli elementi chiave per la creazione del file di input per FDS sono descritti di seguito.

HEAD

È l'elemento necessario a definire il nome del file ed è costituito da due parametri: CHID e TITLE. CHID è una stringa di 30 caratteri o meno usata per nominare i files dei risultati, mentre TITLE è una stringa di 60 o meno caratteri che descrive il caso in esame. Nel caso in esame tutti i file di output saranno automaticamente denominati caso_studio e la descrizione del caso in esame è "Incendio singolo da pozza di carburante in locale chiuso"

GRID

L'elemento GRID contiene le dimensioni della griglia di calcolo che è formata da IBAR celle nella direzione x, JBAR celle nella direzione y e KBAR celle nella direzione z (solitamente scelta per la direzione verticale). La dimensione orizzontale maggiore viene associata alla direzione x.

Le dimensioni della griglia devono essere esprimibili nella forma $2^l \times 3^m \times 5^n$, dove l,m,n sono degli interi, in quanto la maggior parte dei calcoli eseguiti usano una soluzione di Poisson basata sulla Fourier Fast Transform. Nel caso studio Nel caso in esame con la riga "&GRID IBAR=24,JBAR=24,KBAR=12 /" il dominio è suddiviso in $24 \times 24 \times 12$ celle.

PDIM

I parametri dell'elemento PDIM definiscono le dimensioni fisiche del dominio. Il sistema di coordinate adottato per le tre dimensioni è conforme alla regola della mano destra (ortogonale destrorso). L'origine del dominio è nel punto (XBAR0, YBAR0, ZBAR0), il cui valore predefinito è zero, mentre il vertice opposto del dominio è nel punto (XBAR, YBAR, ZBAR). Le dimensioni fisiche del dominio sono espresse in metri e, se non specificato altrimenti, il dominio viene suddiviso uniformemente per formare una griglia di $IBAR \times JBAR \times KBAR$ celle. Se invece si desidera che le celle della griglia non abbiano una dimensione uniforme per tutto il dominio, si devono usare i parametri TRNX, TRNY, TRNZ in modo da determinare la distribuzione delle dimensioni di cella lungo i tre assi.

Nell'esempio dato con la riga "&PDIM XBAR0=-.30,XBAR=0.30,YBAR0=-.30,YBAR=0.30,ZBAR=0.3 /" si identifica un dominio di $0,60m \times 0,60m \times 0,60m$.

TIME

L'elemento TIME definisce la durata della simulazione e l'incremento iniziale di tempo usato per arrivare alla soluzione delle equazioni discretizzate, attraverso i due parametri TWFIN e DT, i cui valori predefiniti sono rispettivamente 0,1s e 1,0s.

Con la riga "&TIME TWFIN=20. /" il codice riconosce come durata della simulazione 20s, mentre DT è impostato al valore di default.

SURF

È l'elemento che definisce le condizioni al contorno per tutte le superfici o aperture all'interno o al confine del dominio considerato. Le coordinate fisiche di un solido o di un'apertura vengono caratterizzate facendo riferimento all'appropriata linea SURF che contiene i parametri dell'elemento che si sta descrivendo. La condizione al contorno predefinita per tutte le superfici solide è quella di parete interna adiabatica. Se soltanto questa condizione è necessaria, non c'è bisogno di aggiungere alcuna linea SURF nel file di input, cosa che non accade se invece si desiderano altre condizioni al contorno, ciascuna delle quali deve essere singolarmente.

Ogni linea SURF è costituita da una stringa identificativa ID per stabilire un riferimento con altri elementi (come VENT e OBST descritti di seguito); pertanto ciascuna linea OBST o VENT deve contenere il parametro SURF_ID e l'indicazione dell'ID della linea SURF che contiene le condizioni al contorno desiderate. Questi parametri descrivono le proprietà termiche e le caratteristiche della combustione, o la velocità e la composizione di un fluido che entra o esce attraverso l'apertura.

In particolare la riga: "&SURF ID='burner', HRRPUA=1000. /" si definisce un incendio modellato sulla base della mixture fraction; HRRPUA è il flusso termico per unità di superficie espresso in kW/m^2 ed è il parametro designato al controllo della velocità di combustione del combustibile. La riga in esame pertanto applica 1000 kW/m^2 a ciascuna superficie con il parametro SURF_ID= 'burner'.

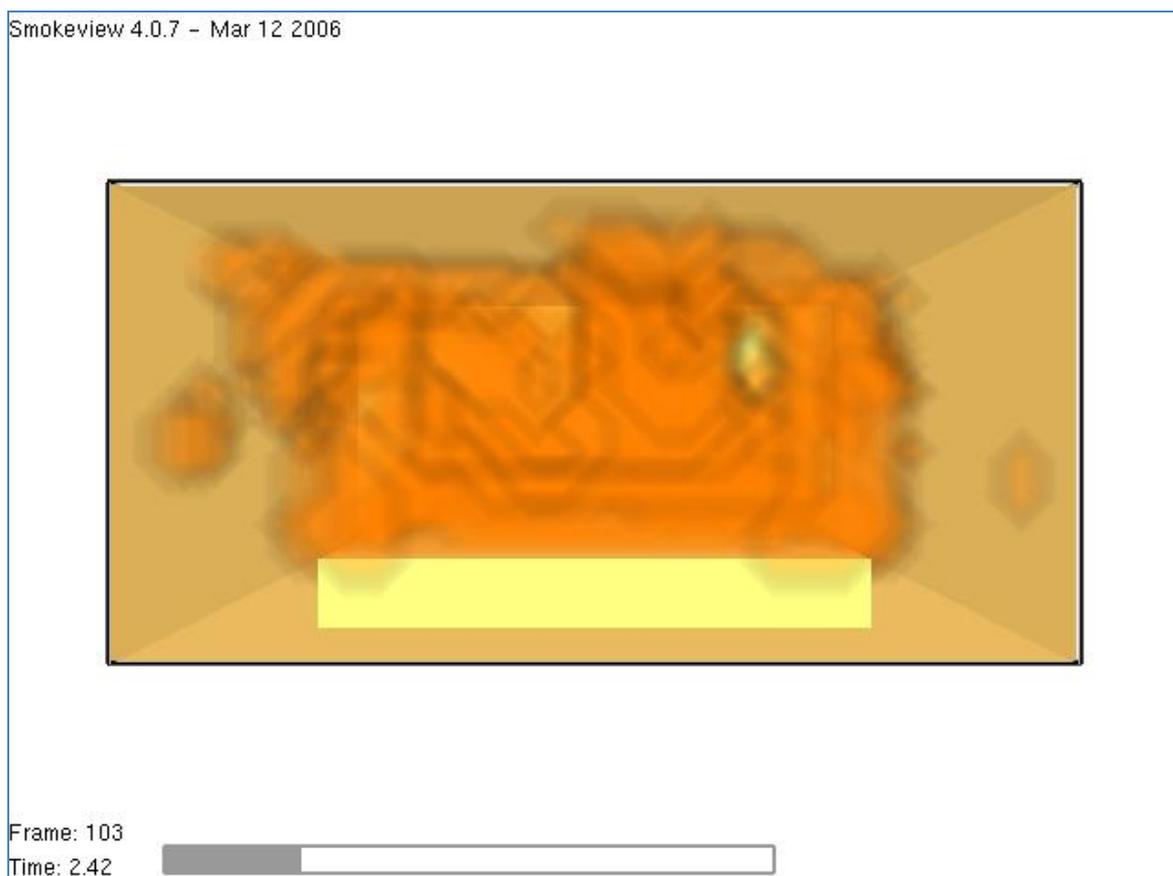
OBST

È l'elemento dove sono specificati i parametri degli oggetti solidi contenuti nell'ambiente. Ogni linea OBST contiene le coordinate di un parallelepipedo rettangolo posizionato

all'interno del dominio, definito attraverso due punti (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) che nella riga OBST si traducono nella sestupla $X_B = X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2$. Inoltre è possibile specificare le caratteristiche delle superfici che delimitano il solido con il parametro SURF_ID, se tutte le superfici hanno le stesse caratteristiche, o SURF_IDS, se si intende specificare il diverso comportamento delle parti del solido (parte superiore, laterale ed inferiore). Il valore predefinito è 'INERT'.

Pertanto con la linea "&OBST XB=-.20, 0.20, -.20, 0.20, 0.00, 0.05, SURF_IDS= 'burner', 'INERT', 'INERT' /" si identifica un solido costituito da pareti laterali e parte inferiore inerti e si localizza il fuoco sulla parte superiore, come visualizzato attraverso lo Smokeview nella figura seguente (Fig. 3.1.1).

Figura 3.1.1: HRRPUV da incendio singolo da pozza di carburante in locale chiuso.



VENT

È l'elemento che permette la definizione delle caratteristiche di un'apertura situata su un oggetto OBST o sulle pareti che delimitano il dominio. Le aperture VENT vengono definite in modo simile agli oggetti OBST, ovvero indicando la sestupla XB per dare le dimensioni della superficie, avendo cura di sceglierla piana e posta sulla faccia di un solido presente in ambiente, o sulle pareti esterne.

Per configurare un'intera parete esterna come un'apertura si può usare il parametro **CB = XBAR, XBAR0, YBAR, YBAR0, ZBAR, ZBAR0**. Così come gli oggetti OBST anche i VENT utilizzano SURF_ID per specificare le loro condizioni al contorno. Se non viene impostato altrimenti l'apertura viene configurata come passiva e posta come 'OPEN'. Se l'apertura presenta un piano di simmetria è possibile porre SURF_ID= 'Mirror'. Soltanto le pareti esterne possono essere configurate come OPEN o MIRROR. Inetere pareti esterne possono essere rimosse se impostate come OPEN e in tal caso vengono considerate aperture verso un ambiente infinitamente grande che accetta o fornisce tutta l'aria che le pressioni muovono sull'apertura.

Con l'usi di IDEVICE è possibile ottenere un'apertura verso l'esterno in base alla temperatura misurata da una sonda HEAT in modo da simulare la rottura delle superfici vetrate che avviene in fase di Flashover.

Le righe del codice: "&VENT CB='XBAR' /, &VENT CB='XBAR0' /, &VENT , B='YBAR' /, &VENT CB='YBAR0' /, &VENT CB='ZBAR' /" , utilizzando il parametro chiave CB, modellano le pareti esterne del locale.

SLCF

È usato per registrare i dati su un intero piano e proporli in forma grafica. Con XB sono date le coordinate del piano dove i dati vengono campionati, mentre il parametro QUANTITY descrive la grandezza osservata; i dati vengono registrati nei file casename_n.sf e utilizzati successivamente dal postprocessore.

Nel codice in esame le righe "&SLCF PBY= 0.,QUANTITY= 'TEMPERATURE'/, &SLCF PBY= 0., QUANTITY= 'HRRPUV'/ &SLCF, PBY=0., QUANTITY=

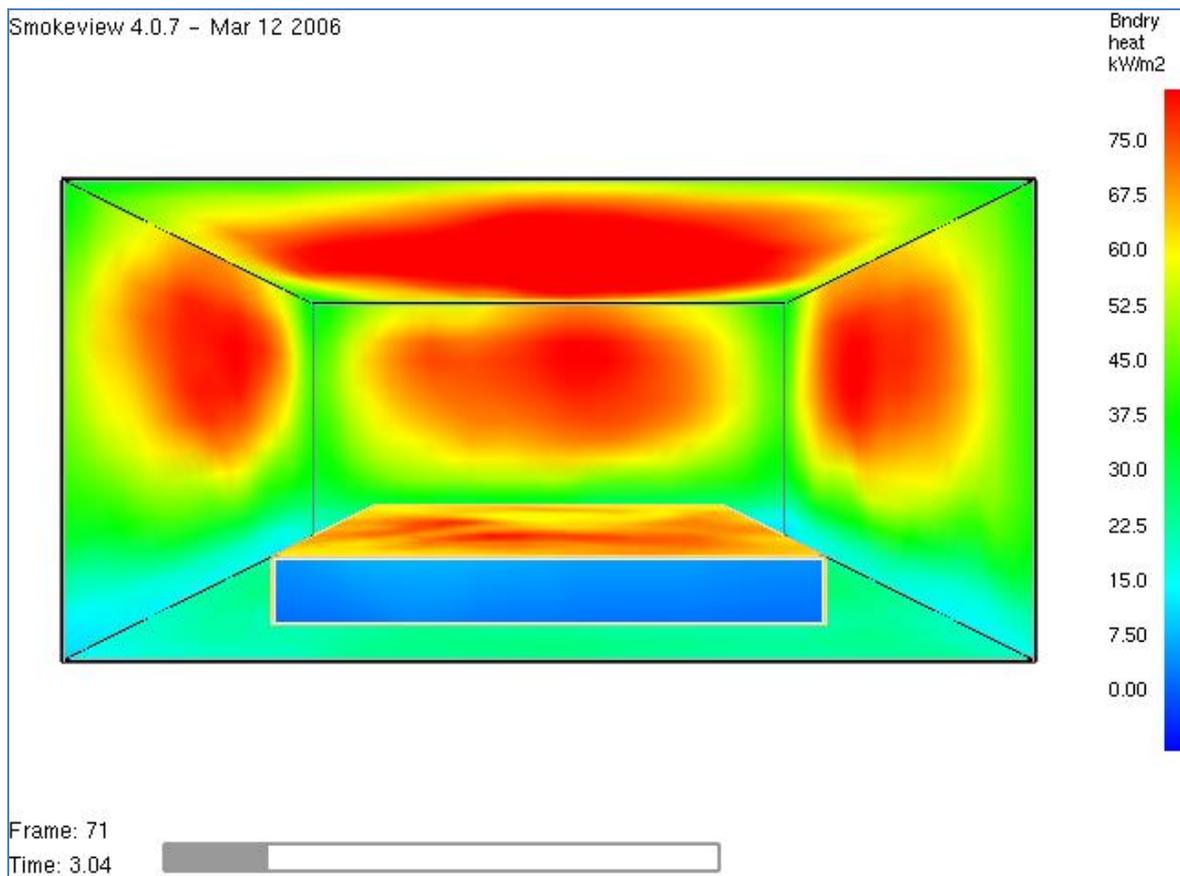
'MIXTURE_FRACTION'/'" permettono il campionamento della temperatura, dell'HRRPUV e della MISXTURE FRACTYION sul piano xz.

BNDF

È l'elemento che permette di registrare gli andamenti di alcune grandezze sugli oggetti solidi definiti nelle righe OBST. Ciascuna quantità richiede una diversa riga BNDF e i files di output sono presenti nella forma CHID_n.bf. Non richiede la specificazione di alcuna coordinata, soltanto della grandezza da analizzare.

Nel caso studio in esame è stato registrato soltanto l'andamento del flusso di calore (HEAT FLUX) attraverso la riga "&BNDF QUANTITY='HEAT_FLUX' /".

Figura 3.1.2: HEAT_FLUX in incendio singolo da pozza di carburante in locale chiuso.

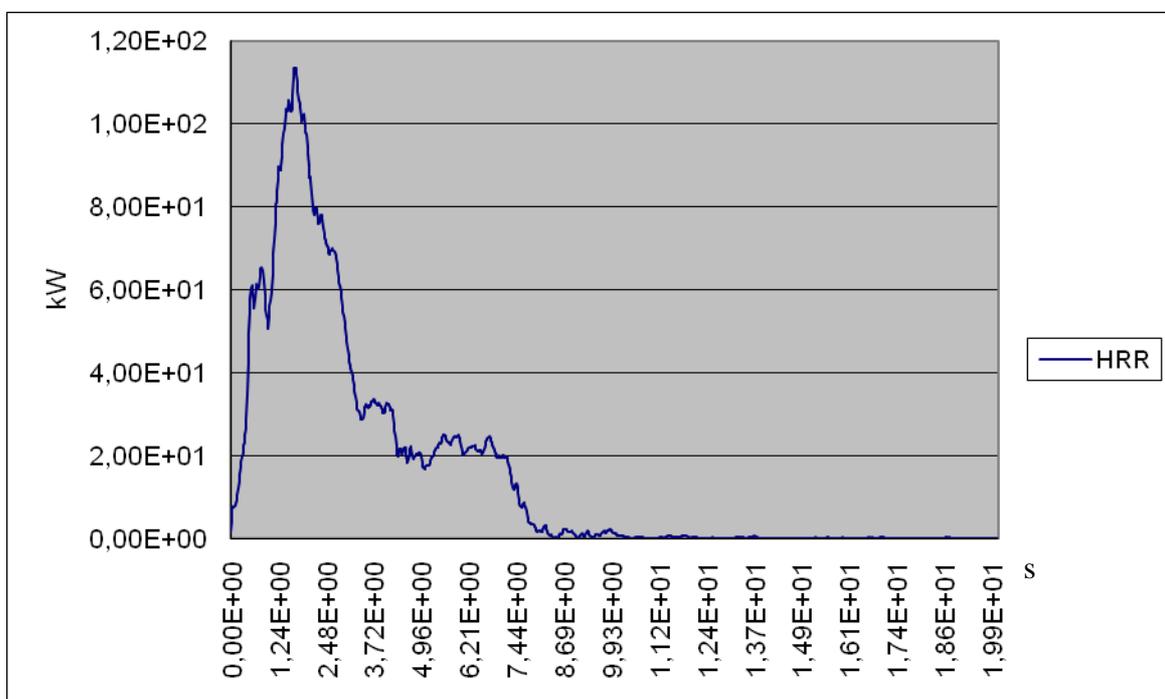


Analisi e lettura dei risultati della simulazione

FDS, come risultato della simulazione, produce come di output sia files di tipo csv che direttamente files excel. Dall'elaborazione di questi ultimi è possibile ricavare l'andamento temporale di alcune grandezze caratteristiche dell'incendio.

Nel grafico riportato in figura 3.1.3 è possibile valutare l'andamento temporale della potenza rilasciata dall'incendio nello scenario simulato, potenza che segue il tipico andamento parabolico crescente fino al valore di circa 117 kW.

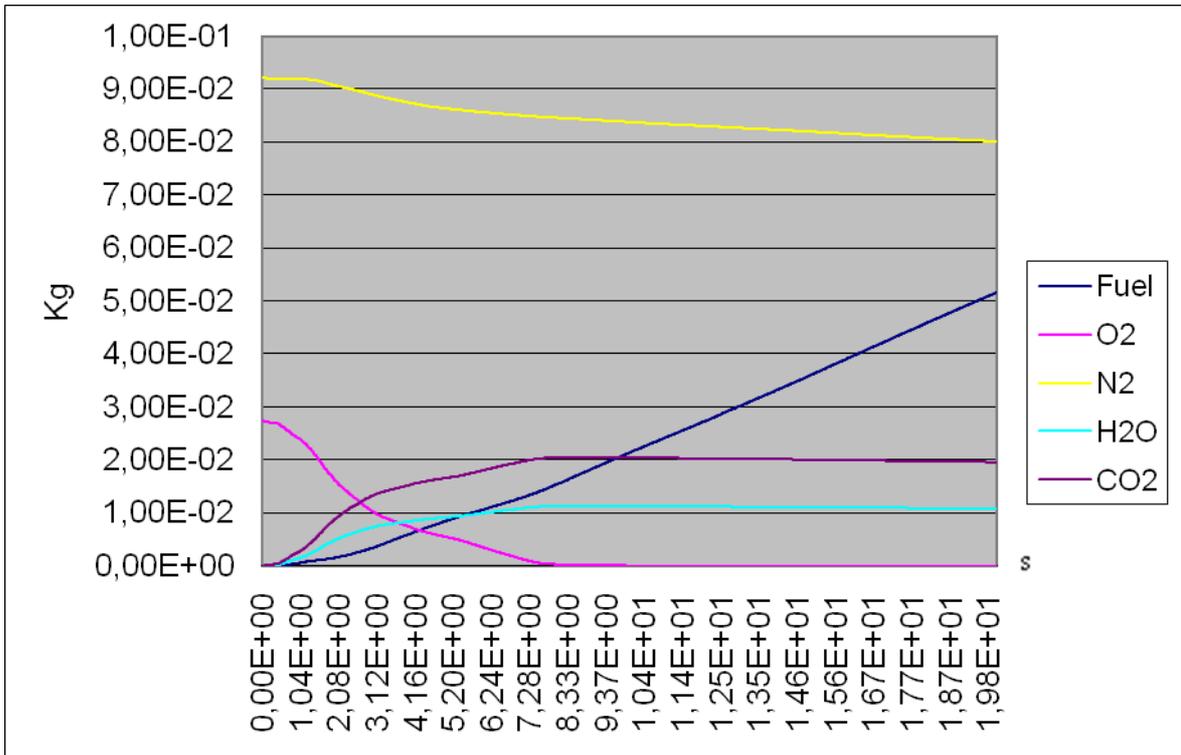
Figura 3.1.3: HRR



In figura 3.1.4 viene invece riportato l'andamento delle masse delle diverse sostanze coinvolte nel processo di combustione, ossia combustibile, ossigeno, azoto, acqua e biossido di carbonio. Il grafico evidenzia un andamento crescente per il combustibile, un andamento decrescente dell'O₂ che si esaurisce intorno al tempo t=8s, istante in cui l'anidride carbonica raggiunge il valore di regime pari a 2 kg. A differenza di quanto mostrato in figura, nel simulare lo scenario inizialmente ci si aspettava un andamento

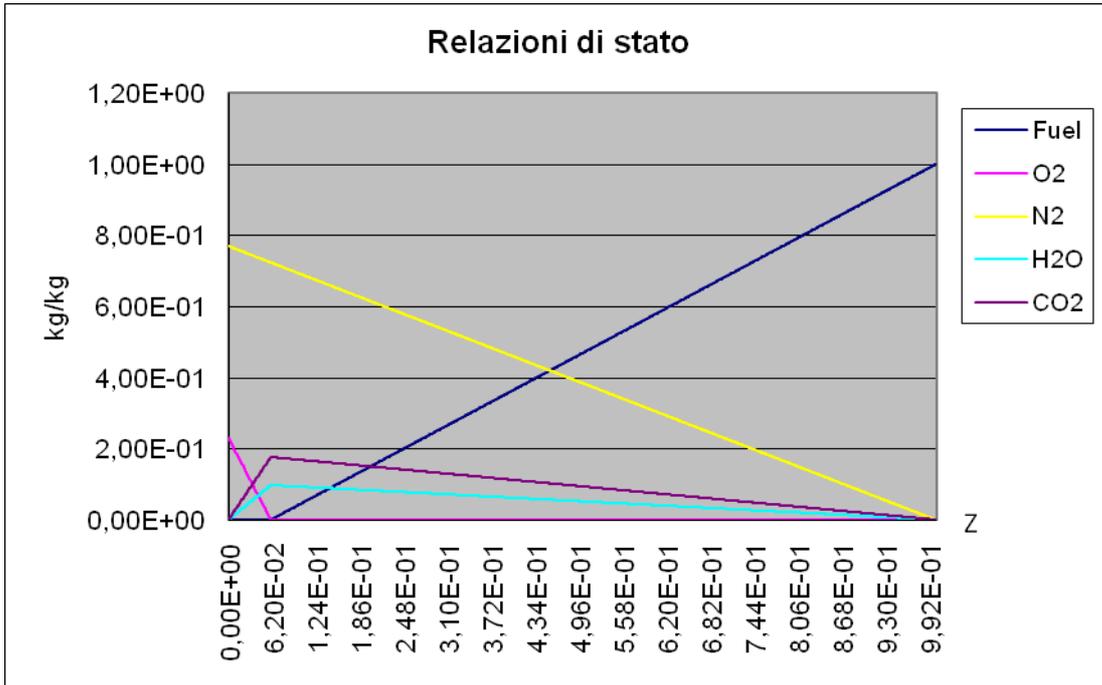
decescente del combustibile. Sembra che quest'ultimo non si esaurisca mai, ma in realtà il combustibile lo si ritrova nell'ambiente vaporizzato.

Figura 3.1.4: Evoluzione temporale delle masse delle specie coinvolte



La figura 3.1.5 mostra invece le relazioni di stato per le stesse specie. È interessante notare come in corrispondenza del valore di mixture fraction pari a $6,20 \times 10^{-2}$ il combustibile e l'ossigeno presentino una frazione di massa pari a 0, a verifica di quanto detto precedentemente a proposito del modello teorico che presuppone la non contemporanea presenza di combustibile e ossigeno.

Figura 3.1.5: Relazioni di stato



3.2 Caso studio generico 2

Per essere sicuri della corretta interpretazione del grafico di figura 3.1.4 in termini di evoluzione temporale del combustibile si è analizzato un secondo caso in cui le dimensioni della pozza di combustibile sono state ridotte fino ad assumere **0,005 m × 0,005 m × 0,005 m**, come evidenziato dalla riga OBST del codice riportato di seguito:

```
&HEAD CHID='esempio2',TITLE='Incendio singolo da piccola pozza di carburante in
piccolo locale chiuso' /
&GRID IBAR=24,JBAR=24,KBAR=12 /
&PDIM XBAR0=-.10,XBAR=0.10,YBAR0=-.10,YBAR=0.10,ZBAR=0.10 /
&TIME TWFIN=200. /
&SURF ID='burner',HRRPUA=1000. /
&OBST XB=-.005,0.005,-.005,0.005,0.00,0.005,SURF_IDS='burner','INERT','INERT' /
```

```

&VENT CB='XBAR' /
&VENT CB='XBAR0' /
&VENT CB='YBAR' /
&VENT CB='YBAR0' /
&VENT CB='ZBAR' /

&SLCF PBY=0.,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY=0.,QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBY=0.,QUANTITY='MIXTURE_FRACTION' /
&BNDF QUANTITY='HEAT_FLUX' /

```

Nella Figure 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 sono riportate le rappresentazioni del flusso termico, delle quantità di sostanze gassose e delle relazioni di stato.

Anche in questo caso il combustibile non si esaurisce nonostante le dimensioni molto ridotte della pozza a conferma del fatto che lo si ritrova vaporizzato nell'ambiente.

Figura 3.2.1: HRR

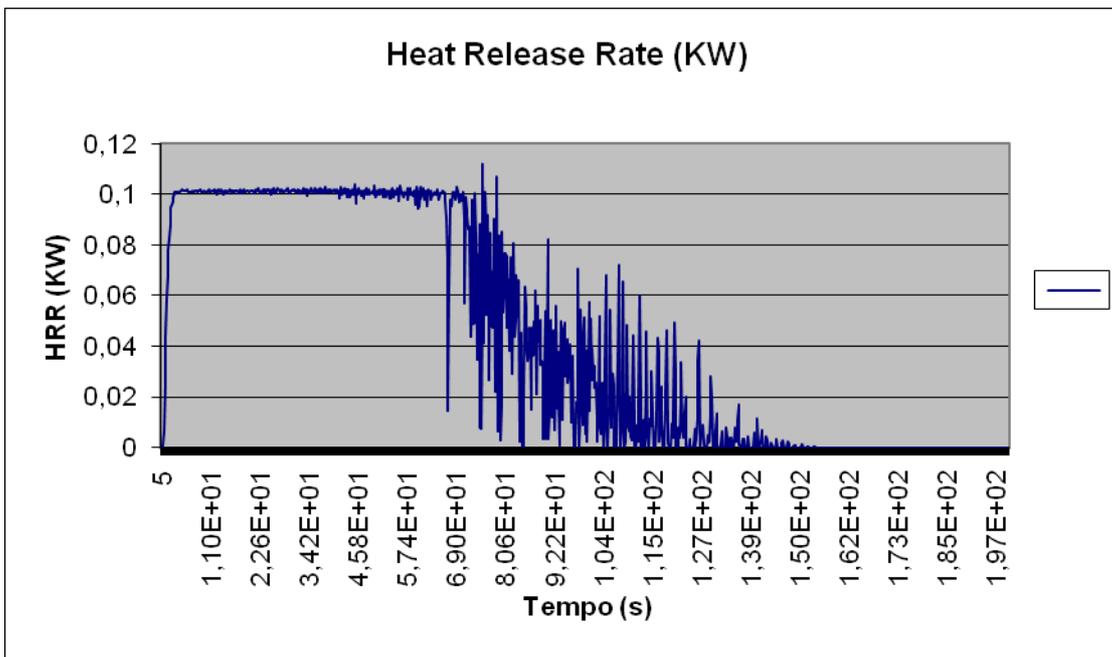


Figura 3.2.2: quantità delle sostanze specie coinvolte

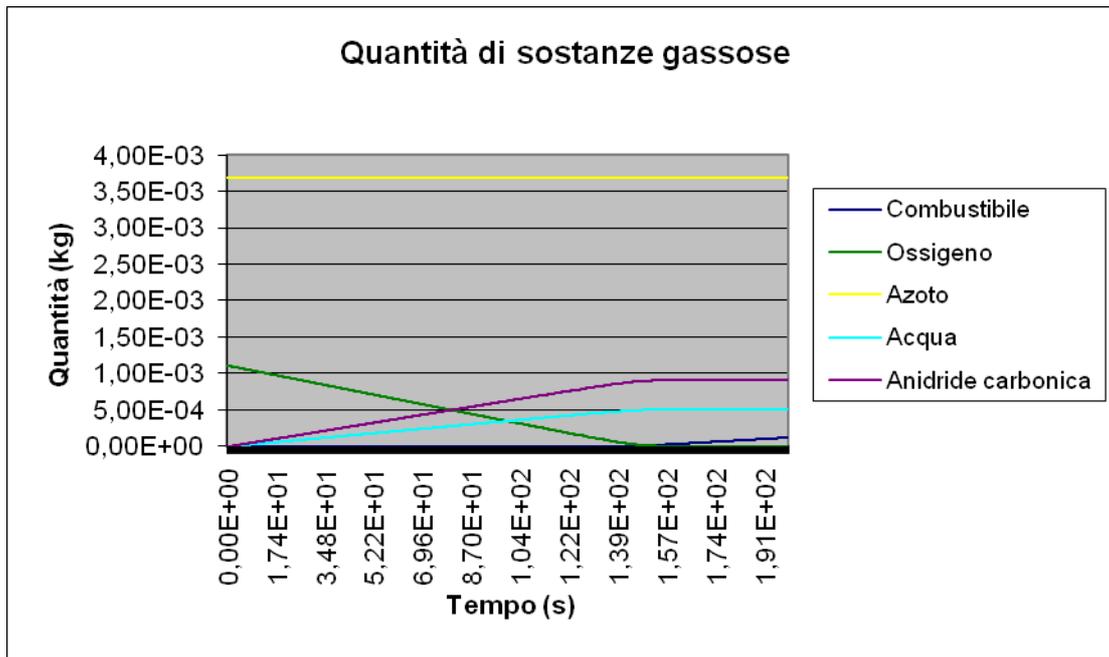
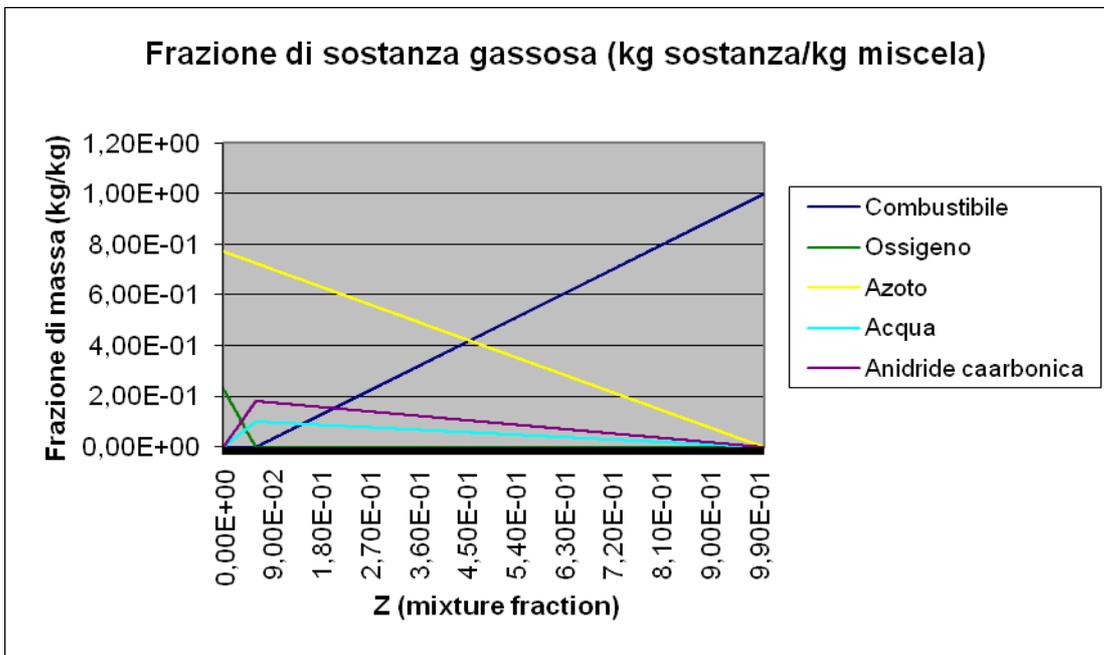


Figura 3.2.3: relazioni di stato



Capitolo 4

L'analisi e la simulazione con FDS dell'evento incendio in un'installazione nucleare

4.1 L'analisi dell'evento incendio nelle installazioni nucleari

Nel corso della vita di un'installazione nucleare si può ipotizzare l'accadimento di eventi di diversa natura, naturali, antropici, malfunzionamenti/rotture di sistemi, incidentali (come l'incendio), ecc. Per ciascuna tipologia di evento devono essere determinate le frequenze di accadimento e valutate le conseguenze. La valutazione, in termini radioprotezionistici, di tutti gli eventi ipotizzabili è oggetto della cosiddetta "analisi di sicurezza".

L'analisi di sicurezza è indirizzata a verificare che in un'installazione nucleare siano rispettati, attraverso opportuna progettazione delle strutture e dei sistemi ausiliari dell'installazione, i requisiti di sicurezza nucleare e gli obiettivi di radioprotezione stabiliti dalla normativa, a seguito di tutti gli eventi ipotizzabili durante la vita dell'impianto.

Gli eventi possono essere suddivisi in 3 categorie, caratterizzate da ben definite frequenze di accadimento e conseguenze in termini di impatto radiologico e per le quali sono stabiliti certi obiettivi di radioprotezione per operatori e per gruppi di riferimento della popolazione in linea con la normativa radioprotezionistica:

- Eventi di categoria 1: eventi che si verificano durante il normale funzionamento dell'impianto essenzialmente collegati alla gestione, manutenzione ed ispezione dell'impianto;
- Eventi di categoria 2: eventi anomali che possono verificarsi durante l'attività dell'impianto, quali malfunzionamenti, rotture di sistemi/componenti di piccola entità;
- Eventi di categoria 3: eventi incidentali gravi quali rotture di sistemi, incendio, alluvione, sisma ecc.

L'analisi di sicurezza si basa su valutazioni deterministiche (tipo FMEA – “Failure mode and effects analysis”) di tipo conservativo – ovvero basate su assunzioni e metodologie caratterizzate da elevati margini di conservativismo dal punto di vista della sicurezza nucleare – dei rilasci di radioattività all'ambiente e delle dosi ad operatori e popolazione a fronte degli eventi ipotizzati. Tale analisi pertanto conduce a valutazioni pessimistiche di rilasci e dosi.

La metodologia consiste nella preliminare identificazione dei possibili eventi che possono interessare l'impianto, nella loro successiva categorizzazione, nella scelta degli eventi rappresentativi di ciascuna categoria e nell'analisi degli eventi scelti al fine di verificare il soddisfacimento degli obiettivi di radioprotezione.

In seguito ai risultati dell'analisi di sicurezza devono essere individuati i requisiti da assegnare ai sistemi di impianto il cui corretto funzionamento consente di assicurare il soddisfacimento degli obiettivi di radioprotezione sopra menzionati.

Di norma la progettazione delle strutture, dei sistemi e dei componenti di un impianto nucleare, svolta sulla base delle norme tecniche di riferimento, consente di soddisfare i requisiti relativi alla categoria 2 di eventi.

Gli eventi che possono occorrere in un'installazione nucleare sono volta per volta diversi a seconda della tipologia di installazione e delle sorgenti di radioattività che possono essere coinvolte. In ogni caso, le categorie in cui vengono suddivisi gli eventi, come già detto, sono identificate da caratteristiche ben definite sia in termini di frequenze di accadimento sia di conseguenze.

Gli eventi di categoria 1 generano impatti radiologici su operatori (e a maggior ragione su popolazione) praticamente nulli dal momento che, in condizione di normale esercizio, non sono previsti rilasci di radioattività e che sono previste e procedurate per la gestione dell'impianto una serie di misure che mantengono le dosi agli operatori entro gli obiettivi di radioprotezione.

Per quanto concerne gli eventi di categoria 2, essi includono malfunzionamenti/anomalie operative di sistemi, guasti strutturali di componenti, singoli errori dell'operatore, rotture meccaniche di piccola entità, ovvero eventi che non possono in alcun modo determinare la

rottura di barriere primarie di confinamento della radioattività all'interno dell'impianto e quindi la dispersione della medesima all'ambiente. Sono eventi che richiedono interventi da parte dell'operatore su componenti/sistemi in ambienti a rischio radiologico basso o nullo. Pertanto l'impatto radiologico derivante dagli eventi di categoria 2 può essere considerato trascurabile dal momento che non comporta incremento di dose agli operatori rispetto alle dosi in gioco durante il normale funzionamento dell'impianto.

Gli eventi di categoria 3 sono eventi sia di tipo interno (quali rotture di sistemi/componenti, incendi) sia esterno (quali sisma, alluvione, tromba d'aria) che possono determinare rotture meccaniche gravi o perdita di integrità delle strutture e pertanto necessitano di analisi approfondita al fine di valutare i rilasci all'ambiente e le dosi ad operatori e popolazione.

Tra gli eventi di categoria 3 è contemplato l'incendio.

L'incendio è ritenuto evento remoto dal momento che la probabilità di accadimento è essenzialmente legata all'errore umano rappresentato da ripetute violazioni delle procedure interne relative all'introduzione di materiali combustibili e/o sorgenti di innesco liberi all'interno dell'installazione. Tuttavia l'incendio viene analizzato nell'ambito dell'analisi di sicurezza al fine di verificare l'adeguatezza dell'installazione anche a fronte di eventi altamente improbabili e poco credibili (*"defence in depth"*).

L'evento incendio è analizzato ipotizzando che l'innesco derivi da sorgente combustibile esterna all'impianto (carico di fuoco accidentale o temporaneo) e che si verifichi il non intervento dei sistemi antincendio e della squadra antincendio di impianto con conseguente combustione completa del materiale combustibile coinvolto. Viene preso in esame il massimo incendio ipotizzabile nell'installazione.

Ai fini di valutare l'effetto di un incendio sulle strutture del locale dove viene ipotizzato lo sviluppo nonché su materiali radioattivi contenuti all'interno del locale medesimo, è utile effettuare la simulazione attraverso opportuni codici come il FDS. Tale simulazione, infatti, consente di determinare, ad esempio, valori di pressione o di temperatura che si possono raggiungere a seguito dello sviluppo dell'incendio e quindi di valutare eventuali rilasci di sostanze radioattive (in caso di perdita delle strutture di confinamento) e/o tossiche (per effetto, per esempio, di processi quali pirolisi, evaporazione).

4.2 Analisi dell'evento incendio in un deposito di rifiuti radioattivi di II categoria

Oggetto del presente paragrafo è l'analisi attraverso il codice FDS dell'evento derivante dallo sviluppo di un incendio all'interno di un deposito nucleare di rifiuti radioattivi di II categoria al fine di studiare l'impatto dell'evento sulle barriere di protezione dell'edificio e sui materiali contenuti all'interno dei fusti nel deposito in termini di possibile rilascio di radioattività all'ambiente esterno.

L'analisi è riferita alla sola fase di stoccaggio del deposito – non viene contemplata la fase di caricamento – ovvero quando non è prevista movimentazione di fusti (se non occasionale per es. per interventi di manutenzione od ispezione) né presenza fissa di personale all'interno dell'edificio.

Come già descritto nel precedente paragrafo, la probabilità di sviluppo di un incendio all'interno di un deposito nucleare con conseguente rilascio di radioattività è teoricamente remota dal momento che essa presuppone il concatenarsi di una serie di eventi quali la molteplice violazione delle procedure normalmente vigenti su questa tipologia di impianto – procedure che non consentono l'introduzione né lo stoccaggio, seppure temporaneo, di materiale combustibile non opportunamente confinato e di sorgenti di innesco di incendio all'interno dell'edificio – e la perdita di integrità dei contenitori dei rifiuti radioattivi che costituiscono barriera al rilascio di radioattività all'ambiente.

Inoltre nell'analisi dell'evento si ipotizza conservativamente il non intervento dei sistemi antincendio a servizio dell'edificio (nel caso in esame rivelatori antincendio interni e idranti esterni) e della quadra addetta alla lotta contro gli incendi di sito.

Con queste ipotesi l'incendio si sviluppa liberamente dall'origine fino a completo esaurimento e l'analisi risulta conservativa.

Il deposito in studio è un edificio a pianta rettangolare di dimensioni 30 m x 20 m e altezza utile di 6 m; il pavimento dell'edificio è costituito da un massetto di calcestruzzo.

La temperatura iniziale interna dell'edificio è di circa 20°C. L'edificio non è servito da sistema di ventilazione e non ci sono aperture su pareti e tetto (con l'eccezione delle porte e dei portoni di ingresso/uscita) attraverso le quali possano verificarsi correnti o movimenti

di aria di consistenza tale da poter influenzare l'evoluzione dell'incendio. Porte/portoni dell'edificio, nella fase di stoccaggio in esame, sono normalmente chiusi.

Nel deposito sono stoccati fusti contenenti materiali a radioattività più elevata (in ogni caso non superiore a quella dei rifiuti di II categoria ovvero *low level waste – LLW*, secondo la Guida Tecnica 26) inertizzati tramite cementazione e fusti contenenti materiale combustibile a radioattività modesta o quasi nulla non condizionati.

I fusti sono sistemati in lotti omogenei dal punto di vista del comportamento al fuoco alternati tra loro al fine della frammentazione del carico di incendio e sono impilati su due strati per un'altezza totale di ciascuna pila di 4 m.

Si ipotizza la sistemazione di un lotto composto da 8 fusti, impilati su due strati, contenenti materiale combustibile non inertizzato disposti a pianta quadrata nella parte alta del lato lungo del deposito a distanza di 2 m dalle pareti esterne.

I fusti presi in esame sono in acciaio e contengono materiale combustibile non inertizzato che in genere è costituito da stracci, tute e altro materiale tecnologico in cotone, PVC o lattice caratterizzato da bassi livelli di contaminazione radioattiva.

Si ipotizza che l'incendio abbia origine da una pozza di gasolio da autotrazione formatosi all'interno del deposito. Il gasolio proviene da un carrello elevatore lasciato incustodito. La pozza si è formata in posizione adiacente al lotto in esame verso l'esterno del deposito con forma rettangolare.

In Figura 4.2.1 è riportata la pianta del deposito con la disposizione dei fusti e la posizione della pozza così come ipotizzati.

Lo scambio termico avviene unicamente verso l'esterno del fusto affacciato all'incendio, avendo applicato una condizione di adiabaticità sulla faccia rivolta verso l'interno.

Il flusso termico incidente è la somma dei flussi dovuti a conduzione, convezione ed irraggiamento.

La superficie dei fusti è stata creata in geometria rettangolare, pur essendo essi di forma cilindrica, considerando tale superficie come lo sviluppo su un piano della superficie esterna reale del cilindro, ciò al fine di mantenere inalterato il fattore di vista tra fusti e fiamme.

Modellizzazione del materiale combustibile (gasolio) e della modalità di innesco

Come scritto in precedenza, l'incendio ha origine da una pozza di gasolio da autotrazione formatasi a seguito di rottura del serbatoio di contenimento del gasolio. Il combustibile proviene da un carrello elevatore lasciato incustodito all'interno del deposito.

Sono state fatte le seguenti ipotesi sulla modalità di innesco dell'incendio:

- L'incendio ha origine dalla pozza di gasolio solo dopo che tutto il gasolio del serbatoio è fuoriuscito dallo stesso riversandosi sul pavimento del deposito; questa ipotesi è conservativa dal momento che in realtà la fuoriuscita di un combustibile liquido da un serbatoio a seguito di rottura avviene per spillamento e quindi con un effetto minore sullo sviluppo del fuoco.
- Il gasolio si posiziona conservativamente in zona adiacente i fusti contenenti materiale radioattivo non inertizzato ciò al fine di massimizzare l'impatto sui fusti critici ai fini dell'analisi sulla sicurezza radiologica.
- Non viene presa in considerazione la pendenza del pavimento del deposito verso le pilete di drenaggio degli scarichi radioattivi accidentali; pertanto il gasolio versato rimane fermo in tutto il suo quantitativo nel punto di sversamento iniziale.
- La forma assunta dalla pozza di gasolio è stata scelta in modo da essere facilmente modellizzabile con il codice di calcolo; l'estensione della pozza ha tenuto conto anche del fatto che superfici troppo ampie avrebbero implicato bassi livelli della pozza, con conseguenti tempi di combustione più rapidi e minore rilevanza del fenomeno, e superfici

troppo piccole avrebbero comportato alti livelli della pozza, condizione poco credibile in assenza di avvallamenti sulla superficie del pavimento.

Di seguito sono riportate le dimensioni della pozza di gasolio simulata e le principali proprietà del gasolio utili ai fini del presente studio:

- Quantitativo gasolio: 70 litri;
- Spessore pozza: 0.002 m;
- Superficie pozza: 35 m²;

- Potere calorifico gasolio: 43700 kJ/kg;
- Densità: 850 kg/m³;
- Perdita di massa durante la combustione: 50 g/(m²*s);
- HRR: 2185 kW/m².

Alla luce dei dati sopra riportati, il tempo necessario per la combustione completa del gasolio della pozza è pari a 34 secondi calcolato tenendo conto che:

$$\text{tempo (s)} = \text{massa gasolio} / (\text{perdita di massa} * \text{area pozza})$$

Di seguito è riportato il foglio di input dei dati al codice FDS:

```
&HEAD CHID='deposito_nucleare',TITLE='Incendio da pozza di kerosene in deposito
nucleare di fusti di rifiuti radioattivi' /
&GRID IBAR=150,JBAR=100,KBAR=30 /
&PDIM XBAR=30.0,YBAR=20.0,ZBAR=6. /
&TIME TWFIN=300. /
&SURF ID='burner',HRRPUA=1685. /
&MISC TMPA=20.,REACTION='DIESEL',
    DATABASE_DIRECTORY='C:\nist\fds\database4\' /
&OBST XB= 26.0, 28.0, 16.0, 18.0, 0.00, 4.00, COLOR='GREEN'
```

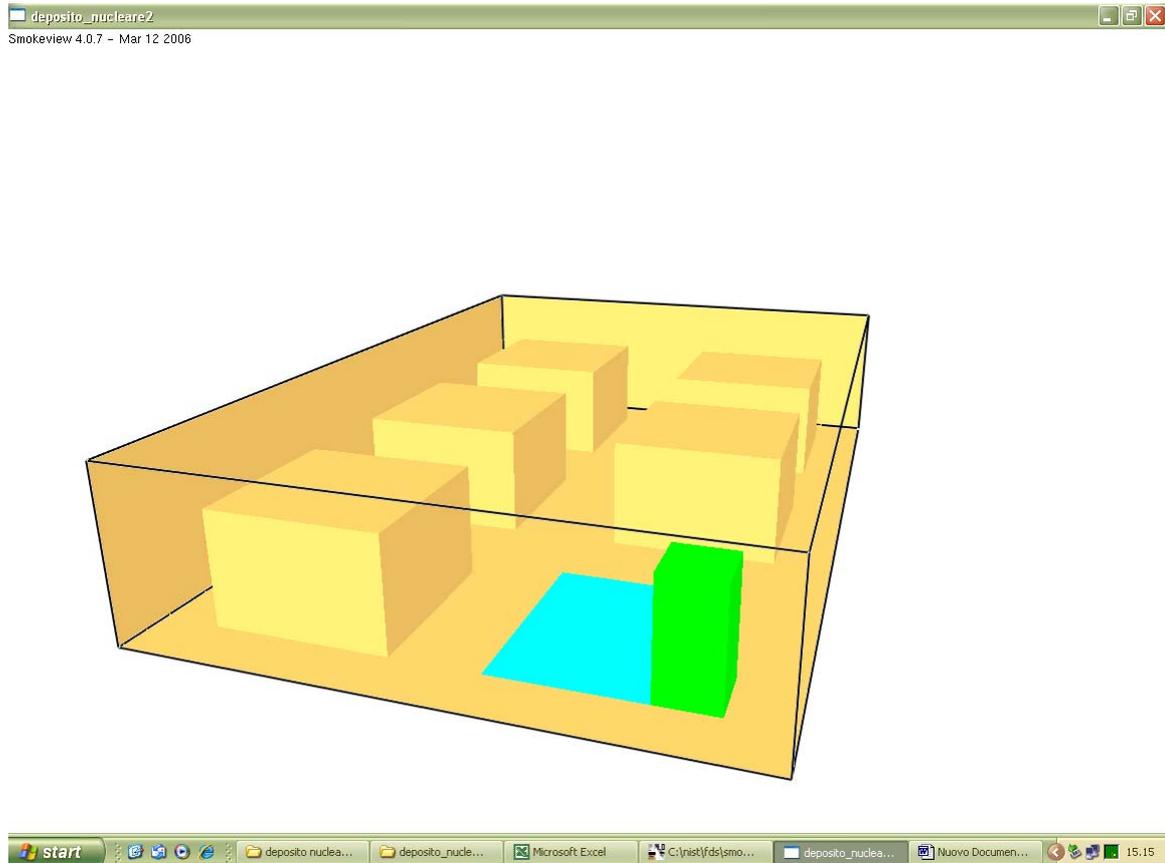
```

&OBST XB=21.0, 28.0, 11.0, 16.0, 0.00, 0.002,SURF_IDS='burner','INERT','INERT',
COLOR='CYAN' /
&OBST XB= 2.0, 8.0, 2.0, 8.0, 0.00, 4.00 /
&OBST XB= 12.0, 18.0, 2.0, 8.0, 0.00, 4.00 /
&OBST XB= 22.0, 28.0, 2.0, 8.0, 0.00, 4.00 /
&OBST XB= 2.0, 8.0, 12.0, 18.0, 0.00, 4.00 /
&OBST XB= 12.0, 18.0, 12.0, 18.0, 0.00, 4.00 /
&SLCF PBX=18.,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=26.,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBX=28.,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY=8.,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY=16.,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBZ=6.,QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY=16.,QUANTITY='HRRPUV' /
&SLCF PBY=16.,QUANTITY='MIXTURE_FRACTION' /
&BNDF QUANTITY='HEAT_FLUX' /

```

Nella Figura 4.2.2 è riportato lo schema grafico del deposito, con la disposizione dei fusti e la posizione della pozza di gasolio ipotizzati, realizzato attraverso il programma di interfaccia grafica Smokeview. I fusti contenenti materiale combustibile sono rappresentati in verde.

Figura 4.2.2

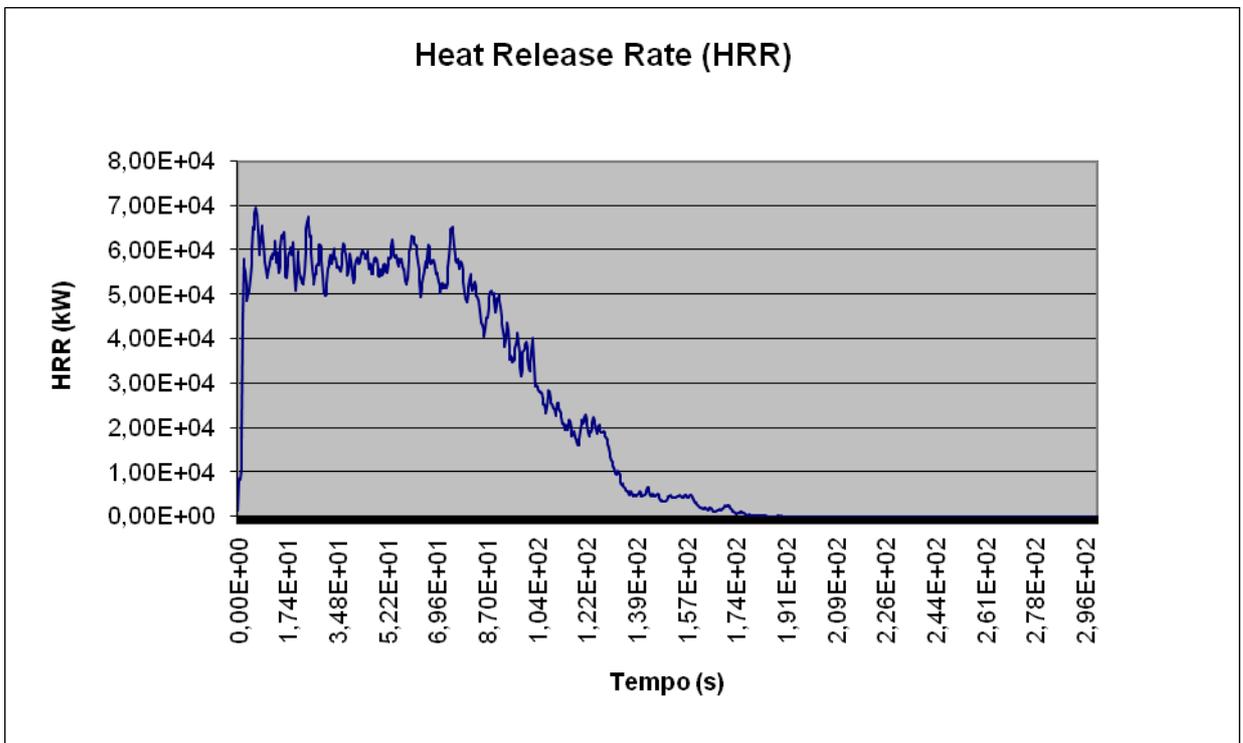


4.3 Analisi dei risultati

Dall'analisi dei risultati forniti dalla simulazione con il codice FDS e dei grafici forniti dal visualizzatore Smokeview si evince che l'incendio si sviluppa verso l'alto liberamente fino ad esaurimento.

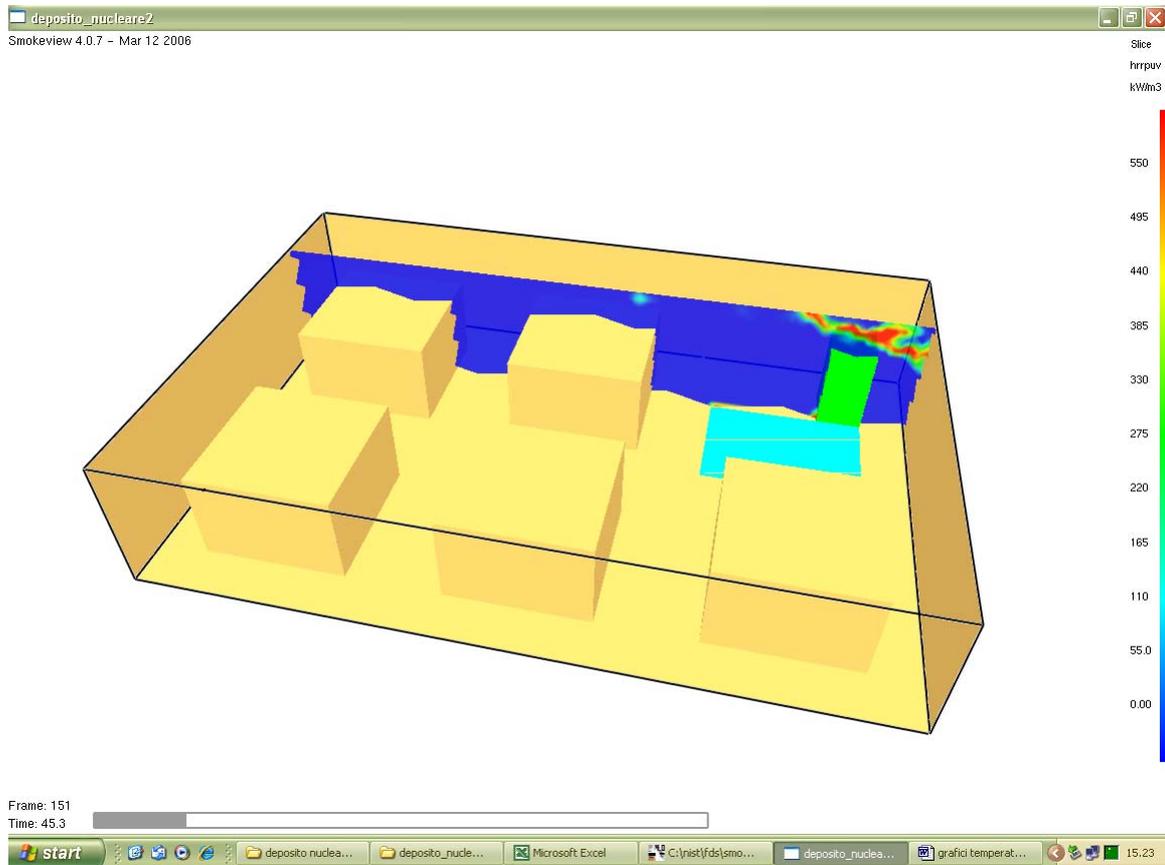
Dal grafico relativo al flusso termico (Figura 4.3.1) e dalla ricostruzione tridimensionale dell'incendio si rileva che al tempo di 20 secondi l'incendio è ancora attivo (flusso termico in crescita) mentre al tempo di 35 secondi le fiamme sono praticamente esaurite (flusso termico massimo) da momento che è stata stimata la fine della combustione del gasolio al tempo di 34 secondi. A questo punto il flusso termico comincia a decrescere fino ad annullarsi al tempo di circa 200 secondi, tempo dopo il quale sia l'ambiente interno del deposito sia la parete dei fusti e del tetto tendono praticamente alle condizioni iniziali.

Figura 4.3.1



Nella Figura 4.3.2 è riportata la rappresentazione, attraverso lo Smokeview, del flusso termico per unità di volume al tempo di 45 secondi circa dalla quale si evince che a tale tempo il flusso è praticamente nullo.

Figura
4.3.2



Le temperature raggiunte durante lo sviluppo dell'incendio sia sulla superficie dei fusti adiacenti la pozza di combustibile sia sulla superficie interna del tetto sono tali da poter escludere condizioni critiche per l'integrità delle medesime sotto l'azione del fuoco.

Di seguito sono riportati alcuni schemi grafici tridimensionali relativi all'andamento della temperatura a diversi tempi di simulazione rappresentati attraverso lo Smokeview.

In particolare, nelle Figure 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5, 4.3.6 e 4.3.7 sono rappresentati i valori della temperatura all'interno del deposito ai tempi di 60, 120, 180, 240 e 300 secondi della simulazione.

Figura

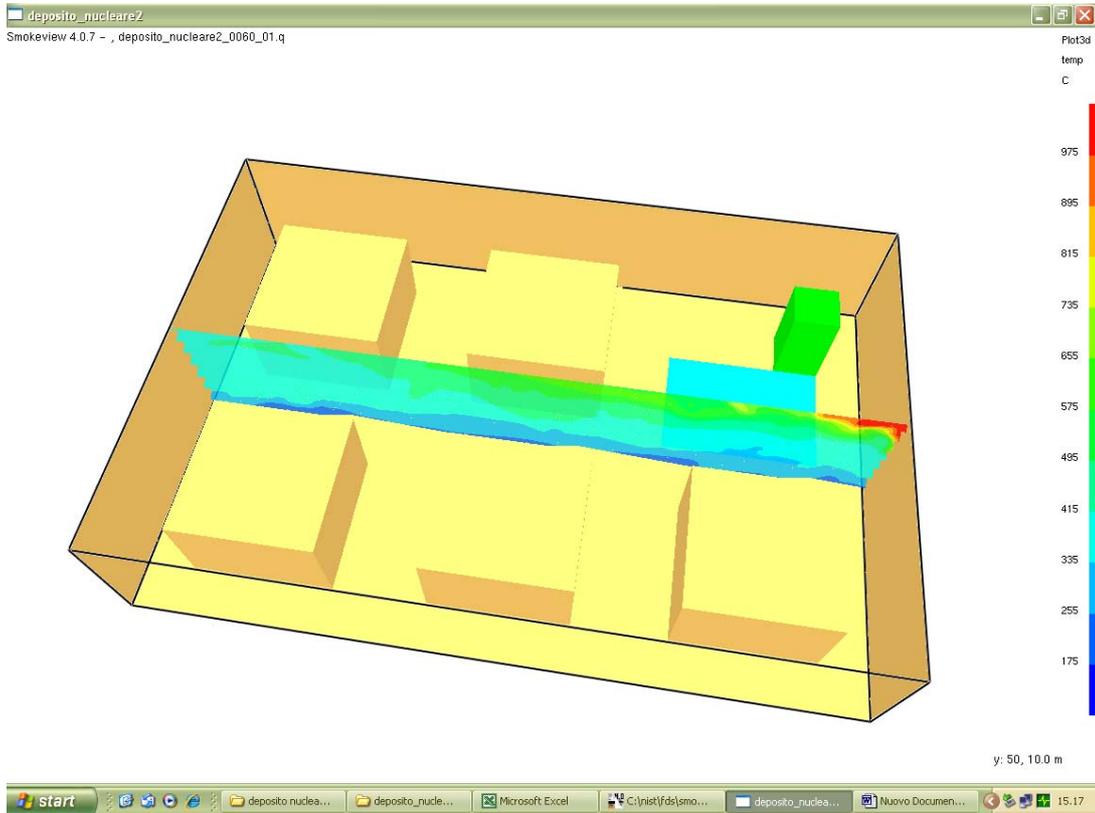


Figura 4.3.4

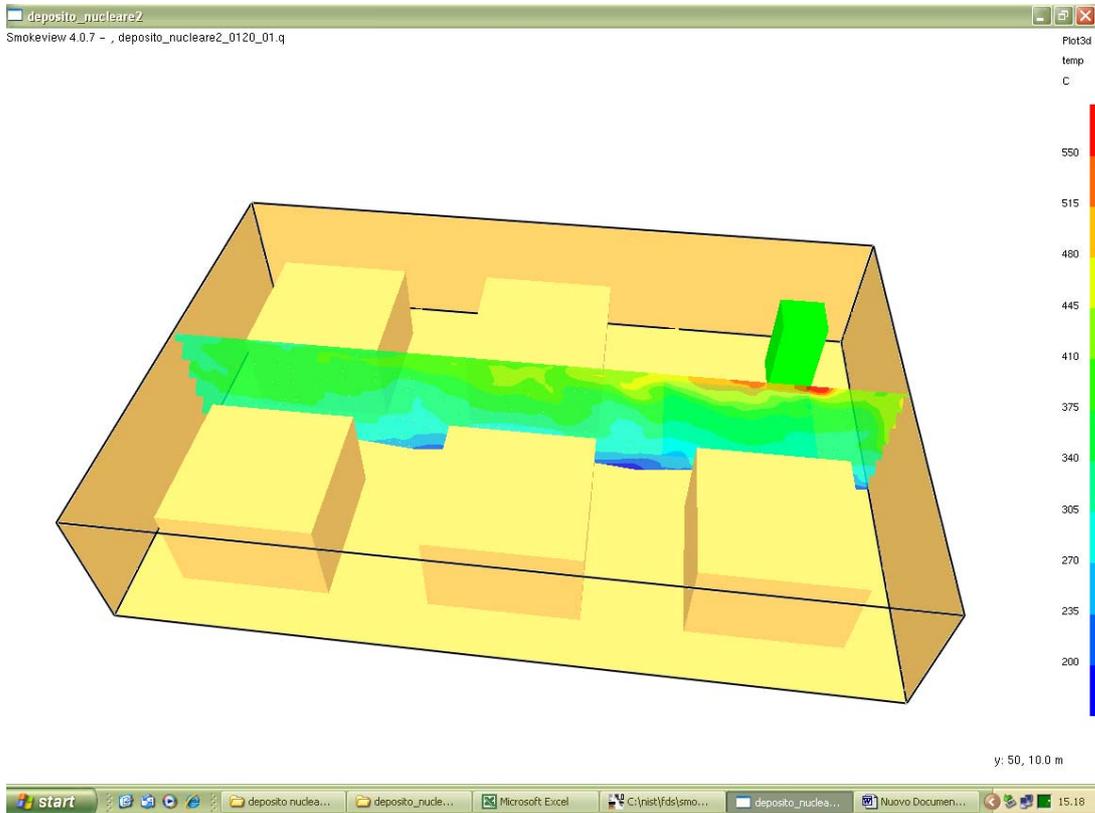


Figura 4.3.5

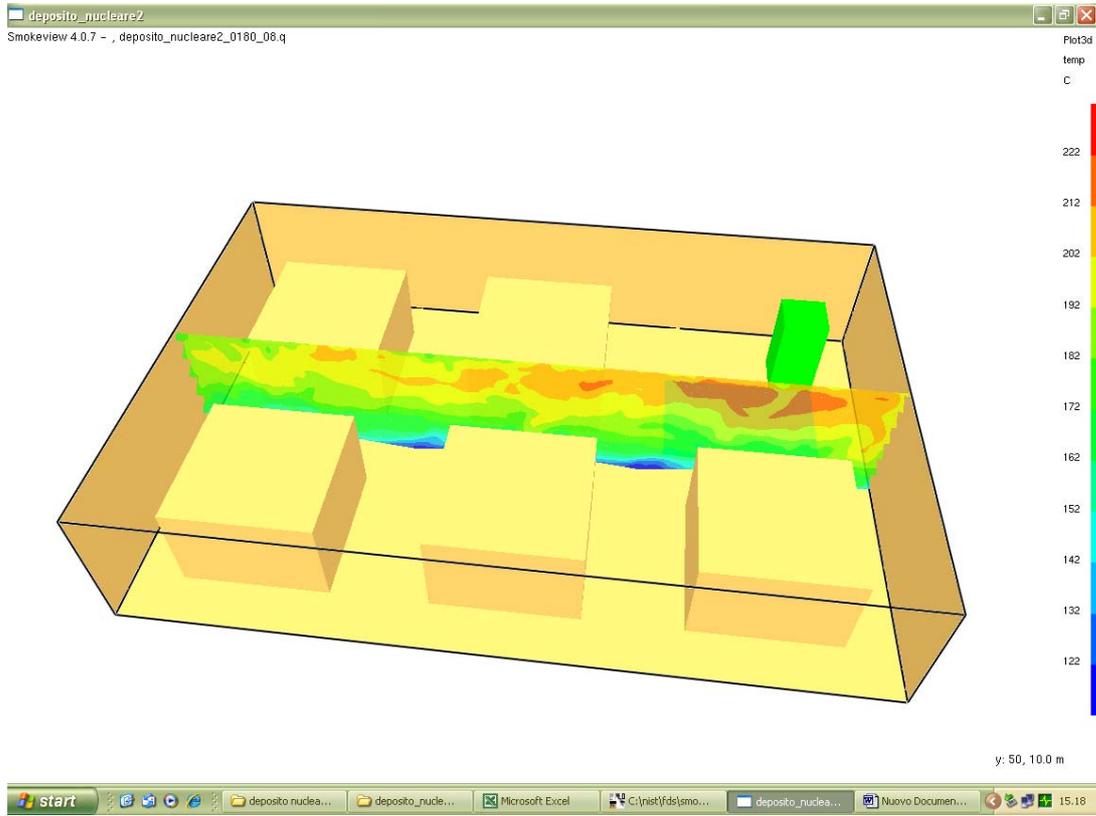


Figura 4.3.6

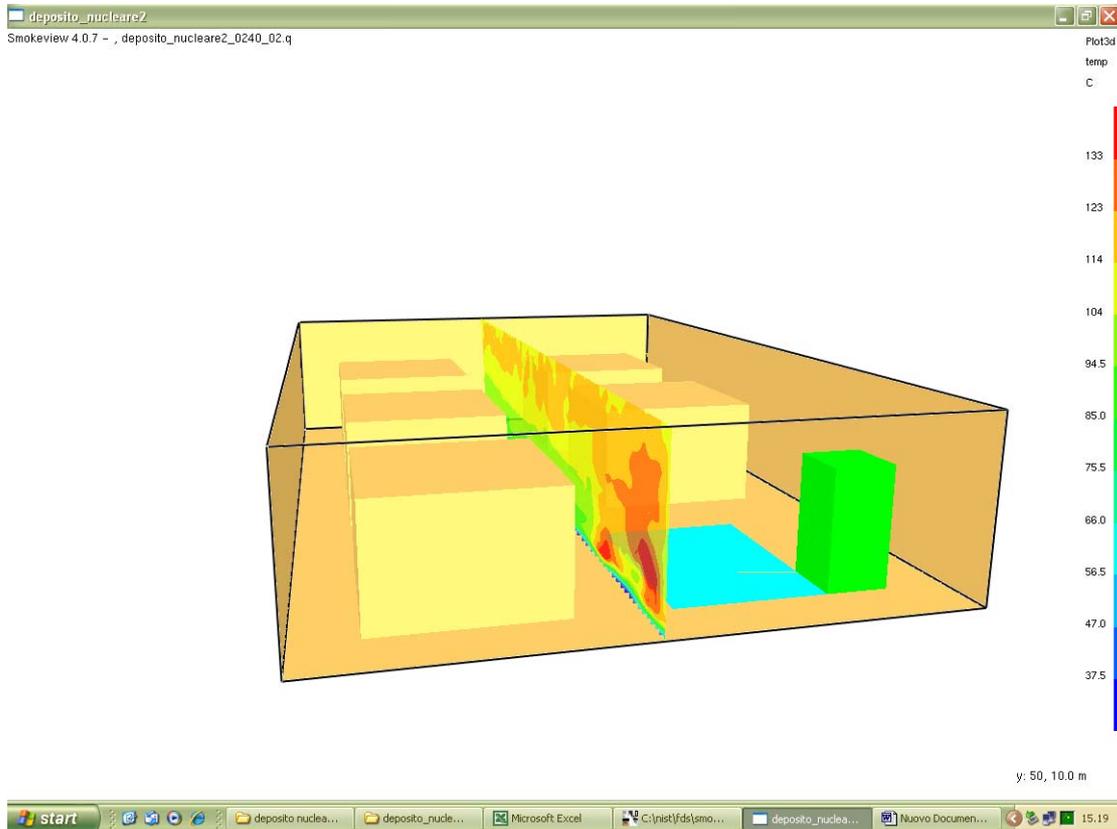
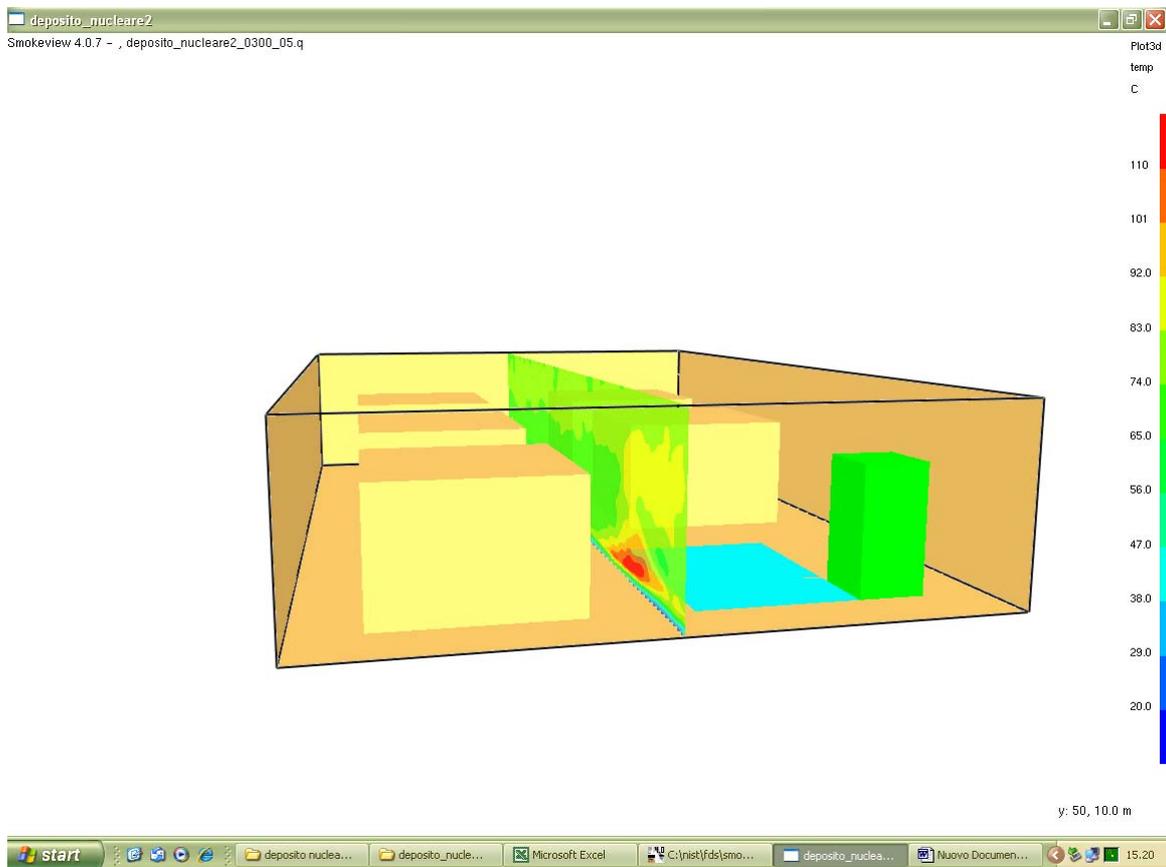


Figura 4.3.7



Nella Figura 4.3.8 è rappresentata la temperatura raggiunta al soffitto del deposito al tempo d circa 80 secondi.

Nelle Figure 4.3.9 e 4.3.10 sono riportati i valori della temperatura sulla superficie dei fusti affacciata all'incendio ai tempi di 40 e 200 secondi circa dai quali si evince che le temperature raggiunte sulla superficie al tempo di 40 secondi non sono critiche per l'integrità dei medesimi e che al tempo di 200 secondi i valori di temperatura sono praticamente tornati alle condizioni iniziali.

Figura 4.3.8

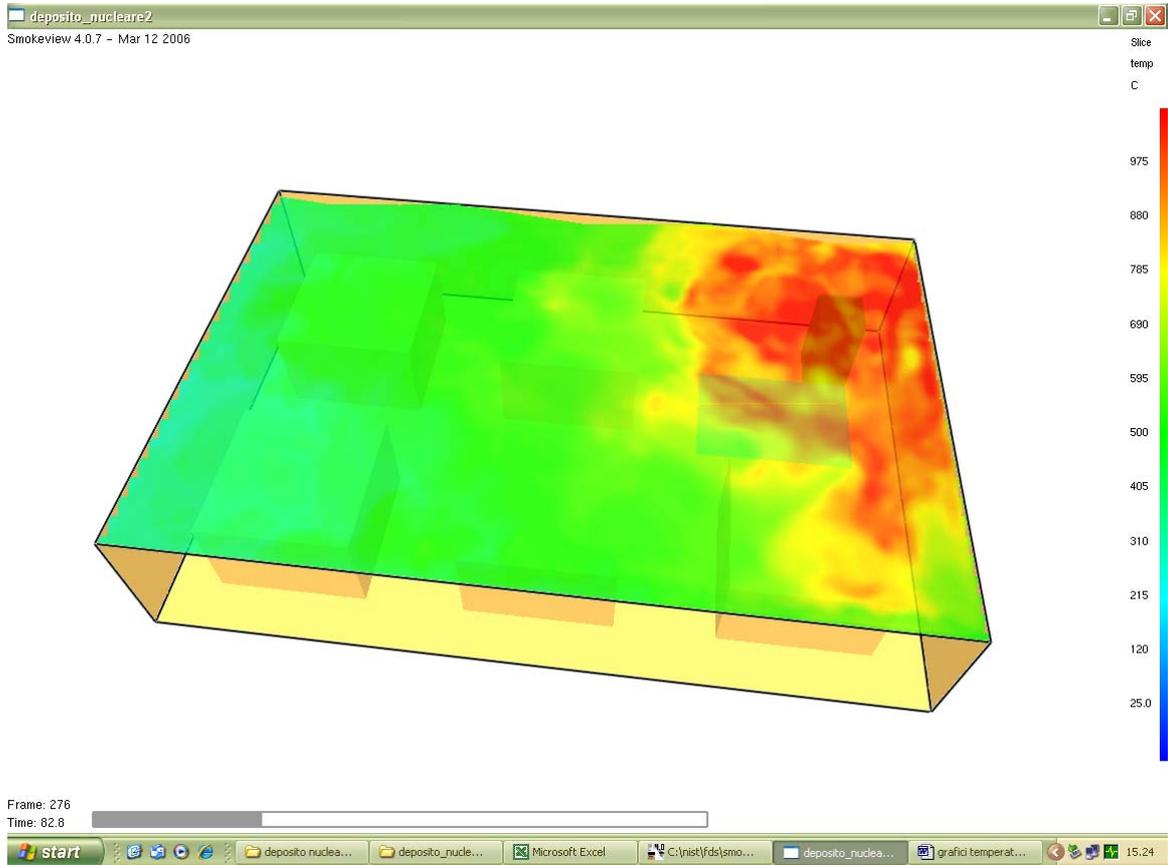


Figura 4.3.9

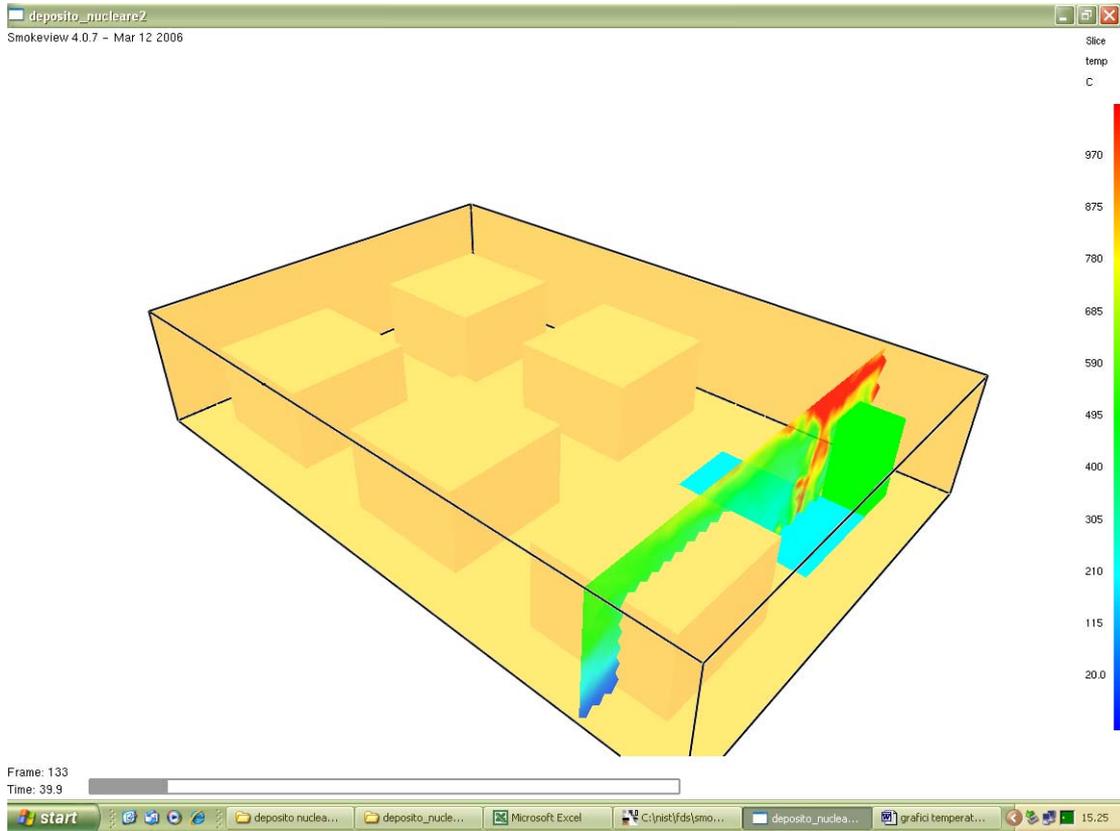
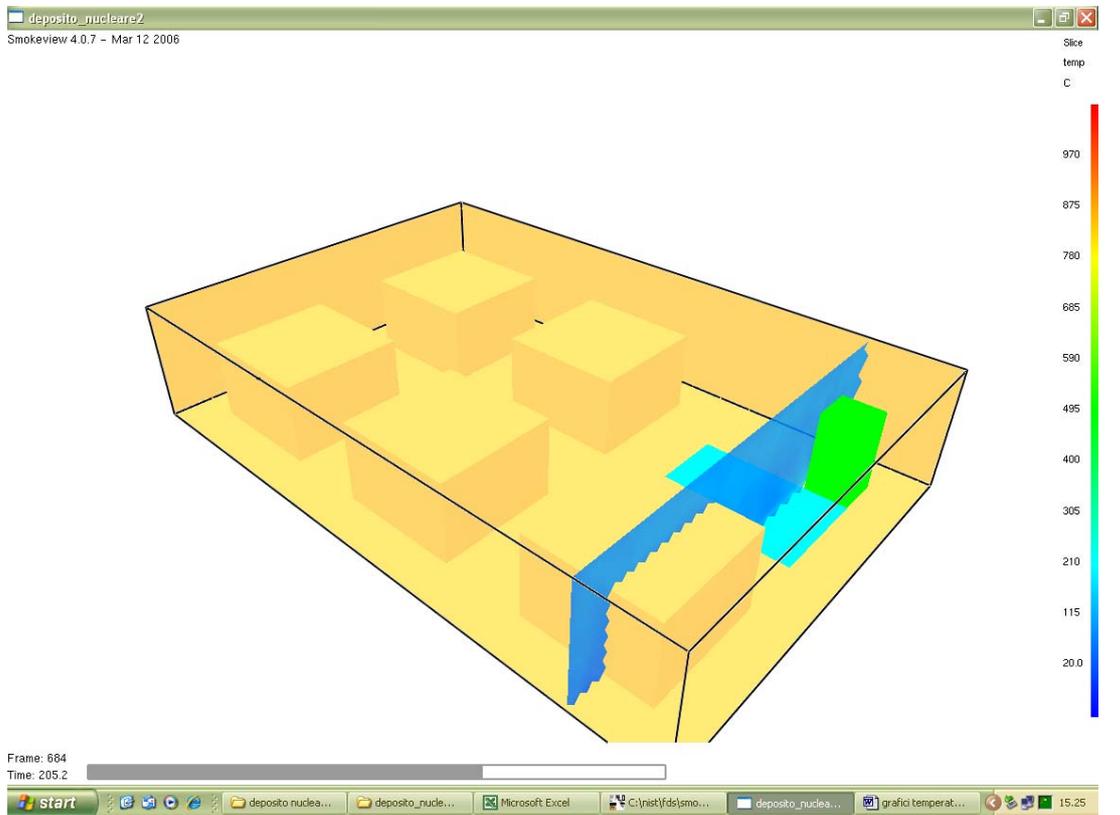


Figura 4.3.10



Inoltre, nelle Figure 4.3.11 e 4.3.12 sono riportati i grafici relativi all'andamento della concentrazione, assoluta e percentuale, in aria delle principali sostanze gassose presenti durante la combustione (reagenti e prodotti di combustione). Dai grafici si evince come il codice FDS non contempli durante la combustione la compresenza in aria di combustibile e comburente (ossigeno) – vedi paragrafo -. Nella simulazione effettuata dal codice infatti la combustione avviene istantaneamente sulla superficie della pozza e la presenza di combustibile gassoso in aria comincia a verificarsi solo ad esaurimento del comburente ovvero quando la combustione è esaurita (tempo di circa 200 sec).

Figura 4.3.11

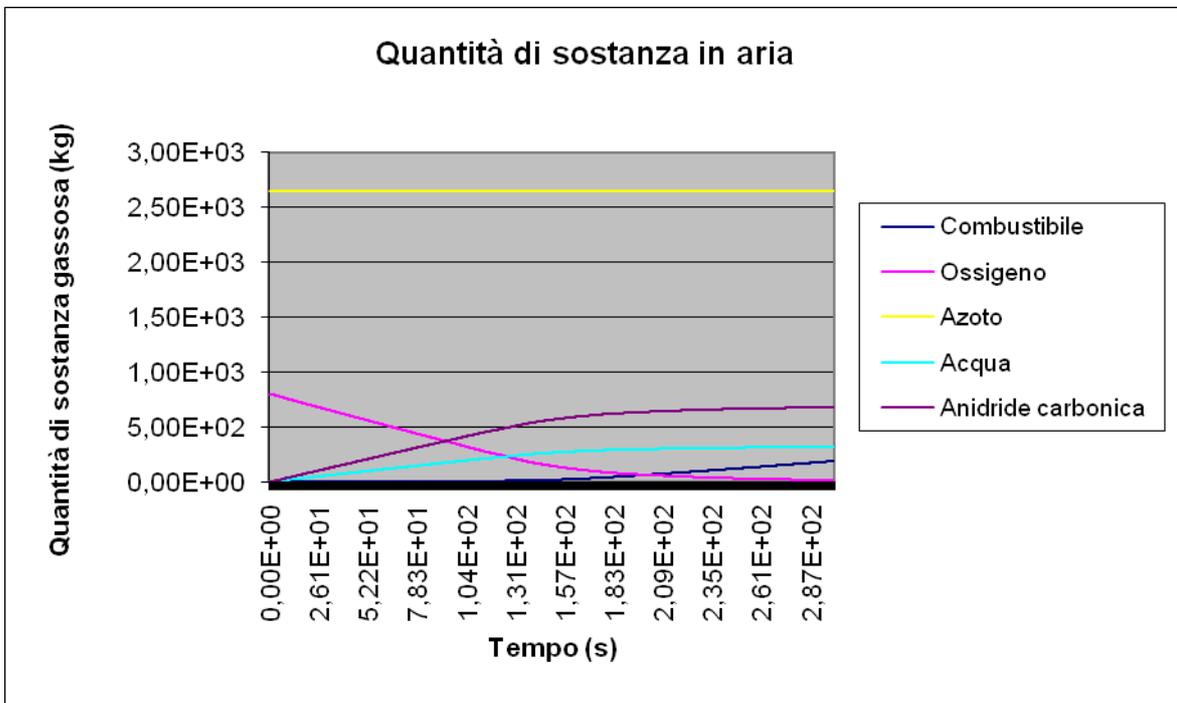
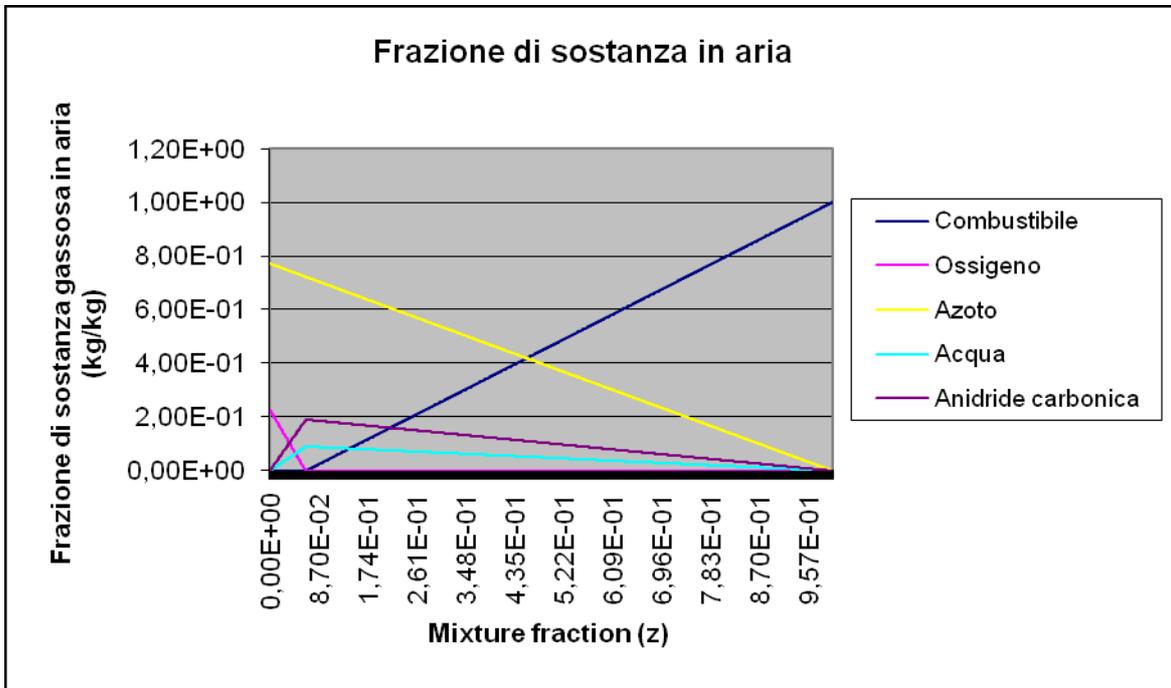


Figura 4.3.12



Conclusioni

Lo studio dell'evento incendio ipotizzato nel presente lavoro effettuato con l'ausilio del codice fluidodinamico FDS ha condotto a risultati ragionevolmente realistici e soddisfacenti.

Lo scenario di incendio ipotizzato all'interno di un deposito di rifiuti radioattivi di II categoria ha comportato il raggiungimento a temperature sia sulle pareti del deposito sia sulle superfici esterne dei fusti immagazzinati in esso tali da poter escludere la perdita di integrità di dette superfici.

In particolare, con riferimento ai fusti, le temperature raggiunte sulla superficie dei medesimi sono risultate inferiori alla temperatura di autocombustione del materiale combustibile e potenzialmente attivato non inertizzato stoccato all'interno dei fusti.

In conclusione, la combustione del materiale contenuto nei fusti presi in esame può essere ragionevolmente esclusa.

Pertanto l'evento incendio ipotizzato all'interno del deposito non ha comportato alcun rilascio di materiale radioattivo verso l'ambiente esterno nel pieno rispetto dei requisiti di sicurezza e degli obiettivi di radioprotezione per gli operatori e per la popolazione richiesti all'installazione.

Bibliografia

1. www.vigilidelfuoco.it
2. www.antincendio.it
3. www.nist.gov
4. NIST National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, U. S. Department of Commerce - NIST Special Publication 1018, March 2006, Fire Dynamics Simulator (Version 4), Technical Reference Guide, Kevin McGrattan, Editor.
5. NIST National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, U. S. Department of Commerce - NIST Special Publication 1019, March 2006, Fire Dynamics Simulator (Version 4), User's Guide, Kevin McGrattan, Glenn Forney.
6. NIST National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, U. S. Department of Commerce - NIST Special Publication 1017, March 2006, User's Guide for Smokeview Version4 – A tool for visualizing Fire Dynamics Simulation Data, Kevin McGrattan, Glenn Forney.
7. Ministero dell'Interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile, Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, Direzione Centrale per la Formazione, Istituto Superiore Antincendi – Roma, FIRE SAFETY ENGINEERING: UN'APPLICAZIONE, C. Barbera, A. Bascià, G. Di Salvo, A. Galfo, R. Lala, S. Lucidi, D. Maisano, G. Mancini, V. Puccia, F. Vorraro.
8. ISA - Istituto Superiore Antincendi, Approccio “prestazionale alla sicurezza antincendio” in edifici di interesse storico artistico: il caso di Santa Maria della Scala in Siena, Quaderni di scienza e tecnica, Gabriele Ballocco, Andrea Carpignano, Luca Nassi.
9. Integrating Historic Preservation with Security, Fire Protection, Life Safety and Building Management Systems, Rome 2003, 10-11 April,10-11, Simulazione di incendio in edificio civile con presenza di pubblico spettacolo mediante modello CFD, FDS3 applicato allo studio dell'andamento dei fumi, A. Ferrari, L. Nigro, G. Coppola.

- 10.** Norma italiana UNICEN, Criteri di difesa antincendio nelle centrali nucleari ad acqua, UNI 8825, Febbraio 1987.
- 11.** U.S. NRC, Fire Dynamics Tools (FDT[®]) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program (NUREG-1805), December 2004, Chapter 3, Estimating burning characteristics of liquid pool fire, heat release rate, burning duration, and flame height, December 2004.