



collana

AiCARR

Cultura e Tecnica per Energia Uomo e Ambiente

INGEGNERIA DELLA SICUREZZA ANTINCENDIO

Guida all'utilizzo di FDS

Giuseppe Ascenzi – Giacomo Villi – Graziano Vulpiani

INGEGNERIA DELLA SICUREZZA ANTINCENDIO – GUIDA ALL'UTILIZZO DI FDS
Giuseppe Ascenzi – Giacomo Villi – Graziano Vulpiani

Copyright © 2010 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. – tel. 0916700686 – fax 091525738

ISBN 978-88-579-0055-1

Prima edizione: ottobre 2010

*Il contenuto del presente volume non impegna in alcun modo l'AICARR
e non va considerato come una posizione ufficiale dell'Associazione*

Ascenzi, Giuseppe <1953->

Ingegneria della sicurezza antincendio : guida all'utilizzo di FDS / Giuseppe
Ascenzi, Giacomo Villi, Graziano Vulpiani. – Palermo : D. Flaccovio, 2010.
(AICARR ; 12)

ISBN 978-88-579-0055-1

I. Incendi - Prevenzione. I. Villi, Giacomo <1979->. II. Vulpiani,
Graziano <1957->.

628.922 CDD-22

SBN Pal0230172

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, ottobre 2010.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

AGGIORNAMENTI - ERRATA CORRIGE - ADDENDUM

Eventuali integrazioni o revisioni al presente testo saranno disponibili all'indirizzo www.darioflaccovio.it/aggiornamenti. È pertanto consigliabile visitare periodicamente tale pagina o iscriversi da www.darioflaccovio.it alla newsletter gratuita *Informazioni editoriali*, che riporta, tra le altre informazioni, anche gli eventuali aggiornamenti.

INDICE

<i>Presentazione</i>	pag.	X
1. CENNI INTRODUTTIVI		
1.1. Generalità	»	1
2. INTRODUZIONE ALL'INGEGNERIA DELLA SICUREZZA ANTINCENDIO		
2.1. La valutazione degli effetti dell'incendio secondo l'approccio ingegneristico	»	3
2.1.1. Analisi preliminare (I fase)	»	4
2.1.2. Analisi quantitativa (II fase)	»	7
2.1.2.1. Modelli di calcolo dedicati alla simulazione di un incendio	»	7
2.1.3. Programma di gestione della sicurezza antincendio (SGSA)	»	8
2.1.4. Sviluppo progettuale e documentazione finale	»	9
2.1.5. La novità dell'approccio prestazionale	»	10
3. IL SOFTWARE FDS		
3.1. Generalità	»	11
3.2. Caratteristiche di FDS	»	11
3.2.1. Modello fluidodinamico	»	12
3.2.2. Modello di combustione	»	12
3.2.3. Calcolo dello scambio termico per irraggiamento	»	13
3.2.4. Geometria	»	13
3.2.5. Calcolo multi-griglia	»	13
3.2.6. Processo di calcolo parallelo	»	13
3.2.7. Condizioni al contorno	»	14
3.3. Caratteristiche innovative di FDS5	»	14
3.3.1. La modellazione della combustione	»	14
3.3.2. La stratigrafia delle superfici solide	»	14
3.3.3. Le zone pressione	»	14
3.3.4. L'interfaccia con modelli strutturali	»	14
3.3.5. Verifica e validazione dei casi	»	15
4. INSTALLAZIONE ED ESECUZIONE DEL PROGRAMMA		
4.1. Avvio del programma	»	17
4.2. Requisiti hardware	»	17
4.3. Requisiti software	»	18
4.4. Esecuzione del programma	»	18
4.5. Monitoraggio del calcolo	»	21
4.6. Supporto all'utente	»	21
4.7. Identificazione del programma (numero della versione)	»	21
4.8. Messaggi di errore	»	22
4.8.1. Errori nella compilazione del file di input (<i>input file errors</i>)	»	22
4.8.2. Errori dovuti ad instabilità numerica (<i>numerical instability errors</i>)	»	23
4.8.3. Errori dovuti a risorse di calcolo non adeguate (<i>inadequate computer resources</i>) ..	»	23
4.8.4. Errori di esecuzione (<i>run-time errors</i>)	»	23
4.8.5. Errori dovuti alla scrittura di file (<i>file writing errors</i>)	»	24
4.8.6. Errori nell'inizializzazione del metodo di Poisson (<i>Poisson initialization errors</i>) ..	»	24
5. IMPOSTAZIONE DEL FILE DI INPUT		
5.1. La formattazione di riga	»	25
5.2. La stesura del file di input	»	27

5.2.1. Intestazione del lavoro	»	29
5.2.2. Impostazione della durata della simulazione	»	29
5.2.3. Impostazione dell'estensione del dominio di calcolo	»	29
5.2.4. Definizione della geometria solida	»	29
5.2.5. Assegnazione delle condizioni a contorno	»	30
5.2.6. Richiesta delle informazioni che si desidera vengano registrate e rese disponibili alla conclusione della simulazione	»	31
6. INTESTAZIONE DELLA SIMULAZIONE E DEFINIZIONE DELLA DURATA E DEL DOMINIO DI CALCOLO		
6.1. Intestazione del lavoro: il gruppo [HEAD]	»	33
6.2. Durata della simulazione: il gruppo [TIME]	»	33
6.3. Definizione della griglia di calcolo: il gruppo [MESH]	»	35
6.3.1. Simulazioni su geometrie piane e a simmetria assiale	»	37
6.3.2. Mesh multiple ed esecuzione in parallelo.....	»	38
6.3.3. Modifica dell'uniformità della suddivisione della MESH: i gruppi [TRNX], [TRNY] e [TRNZ]	»	43
6.3.4. Indicazioni circa la scelta delle dimensioni ottimali da assegnare alle celle della mesh	»	47
6.4. Parametri globali: il gruppo [MISC]	»	48
6.4.1. Interruzione e riavvio della simulazione	»	49
6.5. Argomenti particolari associati all'utilizzo del gruppo [MISC]	»	51
6.5.1. La definizione del vettore gravità (g)	»	51
6.5.2. Soluzione del campo di pressioni per simulazioni multi-griglia	»	53
6.5.3. Modellazione dell'effetto camino	»	53
6.5.4. Regolazione dei parametri di stabilità numerica	»	54
6.6. Assegnazione di condizioni iniziali particolari: il gruppo [INIT]	»	55
6.7. Condizioni circa i valori massimi ammissibili per alcune grandezze fisiche: il gruppo [CLIP].....	»	55
7. LA COSTRUZIONE DEL MODELLO		
7.1. La creazione della geometria solida: il gruppo [OBST]	»	57
7.1.1. Geometrie non rettangolari e superfici inclinate	»	63
7.2. La creazione di aperture: il gruppo [HOLE]	»	65
7.3. Attribuzione di caratteristiche superficiali particolari: il gruppo [VENT].....	»	67
7.3.1. Comandi particolari legati al gruppo [VENT]: gli attributi 'OPEN' e 'MIRROR'	»	72
7.3.2. Controllo delle proprietà superficiali collegate al gruppo [VENT]	»	73
7.3.3. Aspetti particolari legati all'utilizzo del gruppo [VENT].....	»	73
8. CONDIZIONI AL CONTORNO		
8.1. Definizione delle condizioni al contorno: il gruppo [SURF].....	»	77
8.1.1. Condizioni al contorno di tipo termico.....	»	78
8.1.2. Calcolo dello scambio termico convettivo	»	79
8.1.3. Calcolo dello scambio termico radiante: il gruppo [RADI]	»	80
8.1.4. Definizione di una stratigrafia per le pareti solide	»	84
8.1.5. Modalità di calcolo della trasmissione del calore attraverso le superfici solide: il parametro [BACKING]	»	86
8.2. Descrizione dei materiali: il gruppo [MATL].....	»	91
8.2.1. Definizione delle proprietà termo-fisiche dei materiali	»	94
8.3. Aspetti numerici riguardanti la trasmissione del calore.....	»	94
8.3.1. Trasmissione del calore per geometrie cilindriche o sferiche	»	95
8.4. Condizioni al contorno su velocità e flusso totale	»	96
8.5. Condizioni al contorno sulla pressione	»	102
8.5.1. Modellazione dei fenomeni legati all'esistenza di un campo di pressioni: il gruppo [ZONE]	»	104

8.5.2. Modellazione degli effetti dovuti alla permeabilità all'aria	»	107
8.5.3. Parametri necessari alla modellazione dei ventilatori	»	110
8.6. Condizioni al contorno circa l'introduzione di specie chimiche aggiuntive	»	114
8.7. La colorazione di oggetti e superfici	»	114
8.7.1. Il <i>texture mapping</i>	»	116
9. LA VARIABILITÀ IN FUNZIONE DI TEMPO, TEMPERATURA E PARAMETRI DEFINITI DALL'UTENTE DEI COMANDI DI INPUT: I GRUPPI [RAMP] E [TABL]		
9.1. Impostazione della variabilità secondo il tempo	»	119
9.2. Impostazione della variabilità secondo la temperatura	»	122
9.3. Funzioni definite in forma tabellare.....	»	123
10. LA MODELLAZIONE DELLA PIROLISI		
10.1. La pirolisi	»	125
10.2. Combustibili solidi	»	125
10.2.1.La caratterizzazione di superfici complesse	»	130
10.2.2.La caratterizzazione di superfici non simmetriche	»	132
10.2.3.La verifica numerica delle proprietà attribuite alla fase solida	»	134
10.3. Combustibili liquidi	»	137
10.4. Definizione della generazione di specie gassose aggiuntive	»	139
10.5. Lista delle risorse web disponibili per la creazione di un database riguardante le proprietà dei materiali	»	140
10.6. Impostazione di un rilascio termico prestabilito	»	140
10.6.1.Modellazione del rilascio termico impostato a partire dal raggiungimento delle condizioni di ignizione	»	143
10.6.2.Incendi a propagazione radiale	»	145
10.7. La scomparsa degli oggetti coinvolti nella combustione: l'attributo [BURN_AWAY]	»	146
11. LA COMBUSTIONE		
11.1. La modellazione della combustione: il modello a frazione di miscela e il gruppo [REAC]	»	149
11.1.1. Argomenti particolari relativi al modello a frazione di miscela.....	»	156
11.1.1.1. Parametri YIELD	»	156
11.1.1.2. Il parametro HEAT_OF_COMBUSTION	»	157
11.1.1.3. Estinzione delle fiamme.....	»	160
11.1.1.4. Produzione di monossido di carbonio	»	162
11.2. L'introduzione di specie chimiche aggiuntive e la definizione delle rispettive proprietà: il gruppo [SPEC]	»	163
11.3. Il modello di combustione a quantità finite	»	166
12. RAPPRESENTAZIONE DI GOCCE E PARTICELLE		
12.1. Concetti base: il gruppo [PART]	»	169
12.2. Particelle associate ad una superficie solida	»	171
12.3. Particelle presenti precedentemente all'avvio della simulazione	»	172
12.4. Particelle emesse da uno sprinkler o da uno spruzzatore	»	173
12.5. Parametri relativi al controllo delle particelle introdotte nella simulazione	»	174
12.6. Impieghi particolari di particelle e gocce.....	»	175
12.6.1.Iniezione di particelle combustibili	»	175
12.6.2.Estinzione con acqua	»	177
13. FUNZIONI DI CONTROLLO E DISPOSITIVI DI PROTEZIONE		
13.1. Collocazione e orientamento dei dispositivi: il gruppo [DEVC]	»	181
13.2. Dispositivi particolari e definizione delle rispettive proprietà: il gruppo [PROP]	»	182
13.2.1.Sprinkler	»	183

13.2.2. Spruzzatori	» 188
13.2.3. Rivelatori di calore	» 189
13.2.4. Rivelatori di fumo	» 189
13.2.5. Rivelatori lineari di fumo	» 192
13.2.6. Definizione di una generazione di fumo indipendente dal rilascio termico.....	» 195
13.2.7. Apparat di rivelazione ad aspirazione	» 196
13.3. Concetti base della logica di controllo.....	» 198
13.3.1. La creazione e la rimozione di oggetti	» 199
13.3.2. La regolazione delle condizioni al contorno: l'uso combinato dei gruppi [DEVC] e [VENT]	» 202
13.4. Funzioni di controllo avanzate: il gruppo [CTRL].....	» 204
13.4.1. Le funzioni di controllo [ANY], [ALL], [ONLY] e [AT LEAST]	» 204
13.4.2. La funzione di controllo [TIME_DELAY].....	» 206
13.4.3. La funzione di controllo [DEADBAND]	» 206
13.4.4. Le funzioni di controllo [KILL] e [RESTART]	» 207
13.4.5. La funzione di controllo [CUSTOM]	» 208
13.5. Esempi di applicazione combinata delle funzioni avanzate di controllo.....	» 210
13.5.1. Sistema sprinkler a secco con pre-allarme.....	» 210
13.5.2. Sistema sprinkler a secco senza pre-allarme	» 211
14. LA SIMULAZIONE IN CAMPO APERTO	
14.1. La modellazione dell'ambiente esterno	» 215
14.2. Il calcolo dei coefficienti di pressione	» 218
14.3. La modellazione dell'effetto camino	» 219
15. GESTIONE DEI RISULTATI	
15.1. Parametri di controllo delle informazioni di uscita: il gruppo [DUMP]	» 221
15.2. Formulazione delle richieste di output.....	» 223
15.2.1. Impiego del gruppo [DEVC]	» 223
15.2.2. Elaborazione statistica delle grandezze di uscita	» 224
15.2.3. La trasmissione del calore all'interno dei solidi: il gruppo [PROF]	» 227
15.3. L'animazione dei risultati su sezioni piane: il gruppo [SLCF]	» 228
15.4. L'animazione di grandezze in corrispondenza delle superfici solide: il gruppo [BNDF]	» 230
15.5. L'animazione di superfici a valore costante: il gruppo [ISOV]	» 232
15.6. Il formato PLOT3D	» 233
15.7. La rappresentazione tridimensionale degli effetti di un incendio: la funzionalità SMOKE3D	» 234
15.8. Grandezze di uscita particolari.....	» 235
15.8.1. Rilascio termico globale	» 235
15.8.2. Calcolo della visibilità	» 237
15.8.3. Calcolo della stratificazione dei fumi e dei gas caldi	» 238
15.8.4. Calcolo dei flussi termici	» 238
15.8.5. Quantità riferite all'introduzione di particelle liquide	» 239
15.8.6. Calcolo della concentrazione effettiva frazionaria (FED)	» 241
15.8.7. Valutazione dei flussi in ingresso o uscita da un compartimento.....	» 242
15.8.8. Interfaccia di FDS con modelli di analisi strutturale	» 243
15.8.9. La modellazione dell'influenza delle caratteristiche dello strumento di misura utilizzato	» 244
15.8.10. L'impiego dell'applicazione <i>fds2ascii</i>	» 245
15.9. Principali grandezze di output	» 247
16. CONVERSIONE DEI FILE DI INPUT DELLE VERSIONI PRECEDENTI	
16.1. Principali differenze di FDS5 rispetto alle versioni precedenti.....	» 249
16.1.1. La sintassi delle righe di comando	» 249

16.1.2. Dispositivi di controllo	» 250
16.1.3. Definizione della stratigrafia delle superfici solide	» 250
16.1.4. Dispositivi sprinkler	» 251
16.1.5. Parametri relativi alla modellazione della combustione	» 251
16.1.6. Parametri relativi alla richiesta delle informazioni di output	» 252
17. L'IMPIEGO DI SMOKEVIEW PER LA VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI	
17.1. L'avvio del programma Smokeview	» 253
17.2. La manipolazione della scena	» 253
17.3. Le opzioni del menu principale	» 255
17.4. Grafica quantitativa	» 263
17.5. La visualizzazione tridimensionale della riduzione della visibilità: la funzionalità SMOKE3D	» 266
17.6. La creazione di dispositivi	» 267
17.7. Risoluzione dei problemi	» 268
17.8. La creazione e la modifica del file di inizializzazione	» 269
17.9. Elenco dei comandi da tastiera	» 272
18. ASPETTI TEORICI DELLA MODELLAZIONE	
18.1. La fluidodinamica computazionale	» 275
18.2. La combustione	» 279
19. RIFERIMENTI LEGISLATIVI E NORMATIVI	
19.1. Riferimenti legislativi in materia di prevenzione incendi	» 285
19.2. Attività CEE in materia di prevenzione incendi	» 286
19.3. Riferimenti normativi riguardanti la resistenza al fuoco e la prevenzione incendi	» 287
19.4. Attività ISO (<i>International Standard Organization</i>) riguardante l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio (<i>Fire Safety Engineering</i>)	» 290
19.5. Riferimenti NFPA (<i>National Fire Protection Agency</i>) riguardanti la prevenzione incendi	» 290
APPENDICE A. ESEMPI GUIDATI DI CALCOLO	
A.1. Il rilascio termico di oggetti reali: il problema dei dati di input	» 293
A.2. Modalità di rilascio termico	» 296
A.3. Modellazione di un sistema sprinkler	» 297
A.4. Esecuzione sequenziale di FDS ricorrendo ad un file batch	» 300
APPENDICE B. LISTA ALFABETICA DEI COMANDI	» 301
Riferimenti bibliografici	» 325

Presentazione

La concezione della sicurezza antincendio sta evolvendo, a seguito dei recenti interventi legislativi (Decreto Ministeriale 9 maggio 2007), dalle tradizionali norme di tipo prescrittivo verso un approccio di tipo prestazionale che richiede l'elaborazione di uno schema di analisi articolato in fasi tra loro correlate.

Vanno analizzate le caratteristiche del progetto, definiti gli scenari di incendio, quantificati i livelli di prestazione attesi, verificata l'accettabilità delle diverse soluzioni progettuali. Tale metodologia, che rientra nell'ambito della *fire safety engineering*, disciplina ormai ampiamente riconosciuta a livello internazionale, richiede al progettista, oltre ad un'approfondita conoscenza della complessità dei fenomeni in esame, il ricorso a strumenti di simulazione e software che gli permettano di verificare e confrontare i risultati relativi alle diverse ipotesi di progetto.

FDS (*Fire Dynamics Simulator*) è un software sviluppato dal *Building and Fire Research Laboratory* (BFRL) del *National Institute of Standards and Technology* (NIST), dedicato all'analisi del moto dell'aria indotto da effetti termici e dei fenomeni di trasporto di calore e fumo tipici degli incendi ed è basato su tecniche di fluidodinamica computazionale (CFD).

FDS è stato oggetto di numerosi test di verifica, sia interni al NIST sia a cura di enti esterni, che lo hanno riconosciuto come adeguato strumento di verifica numerica. Grazie all'evoluzione delle capacità di calcolo messe a disposizione dalla moderna tecnologia, la tecnica CFD rappresenta lo strumento che meglio consente, in termini di costi e di tempi, l'analisi dell'efficacia di diverse ipotesi progettuali riguardanti le geometrie o le diverse condizioni operative.

La principale difficoltà che si prospetta al progettista che stia valutando il ricorso a tale tecnica di indagine, prima ancora che dagli aspetti linguistici, deriva da una questione di metodo. Data l'ampia variabilità degli scenari di incendio ipotizzabili, è evidente come frequentemente possa accadere che la situazione progettuale in esame non ricada tra quelle usualmente considerate, laddove il tradizionale metodo prescrittivo era piuttosto basato sull'applicazione *a priori* delle misure di prevenzione e protezione da adottare per garantire la sicurezza antincendio.

AICARR è da anni attiva nel campo della formazione, attenta alle problematiche sempre più stringenti in materia di sicurezza e consapevole del ruolo di una buona progettazione, anche per la parte relativa alla sicurezza antincendio. Per questo, il lavoro svolto da Giacomo Villi, Giuseppe Ascenzi e Graziano Vulpiani con la supervisione del Prof. Roberto Zecchin risulta al tempo stesso utile e tempestivo.

Sono convinto che il progettista interessato avrà ora a disposizione uno strumento per avvicinarsi alla modellazione tramite software dei processi che governano lo sviluppo e la crescita di un incendio. Inoltre, non solo disporrà della risposta a esigenze non contemplate dalle norme di tipo prescrittivo ma avrà anche la possibilità di ricorrere al metodo prestazionale come strumento preferenziale per poter esprimere un contributo personale e innovativo alla progettazione di un ambiente sicuro.

Renato Lazzarin
Presidente AICARR

1

Cenni introduttivi**1.1. GENERALITÀ**

Il Decreto del Ministero dell'Interno del 9 maggio 2007 ha sancito l'introduzione del cosiddetto approccio prestazionale nel quadro legislativo riguardante la prevenzione incendi. Tale metodo va ad affiancarsi al più tradizionale metodo prescrittivo basato sull'applicazione di regole tecniche cui spetta il compito di fissare, per i vari possibili scenari, le misure di protezione da adottare per garantire la sicurezza antincendio.

Nel nuovo approccio ingegneristico confluiscono diverse esigenze: da un lato, quella del legislatore di continuare a tutelare la sicurezza di persone e cose, dall'altro, la richiesta, da parte dei progettisti, di maggiore flessibilità in determinate situazioni per le quali – si pensi, ad esempio, al problema rappresentato da edifici sottoposti a tutela architettonica – le norme tecniche che disciplinano la prevenzione incendi risultano di fatto inapplicabili a causa dei vincoli imposti.

L'approccio ingegneristico si esplicita nella previsione della successione temporale delle varie fasi di evoluzione di un incendio per calcolare il livello di esposizione di persone e cose a calore e sostanze tossiche e per valutare l'azione meccanica delle fiamme sulle strutture esposte al fuoco. I valori ottenuti da tale fase di calcolo andranno poi confrontati con il livello di prestazioni minimo richiesto alla costruzione in esame.

Gli elevati costi o addirittura l'impossibilità di ricorrere ad una sperimentazione fisica hanno favorito il ricorso alla fluidodinamica computazionale nella progettazione. Tale tecnica di simulazione consente di valutare la risposta dell'edificio indagato a diverse condizioni operative, permettendo di eseguire analisi e previsioni dello scenario su un elevato numero di casi di studio.

FDS (*Fire Dynamics Simulator*) è un modello di calcolo basato sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes, sviluppato presso il NIST (*National Institute of Standards and Technology*) e dedicato specificatamente all'analisi degli scenari di incendio. Al di là dell'impostazione matematica del problema, questo lavoro intende fornire una guida all'utilizzo del codice di calcolo, traducendo e riordinando il materiale contenuto nella guida che accompagna la versione più

recente del programma (versione 5) così da fornire in modo preciso e dettagliato tutte le informazioni necessarie alle varie fasi che vanno dall'installazione del programma fino all'analisi dei risultati ottenuti mediante l'esecuzione di simulazioni. La documentazione originale, in lingua inglese, è disponibile all'indirizzo <http://fire.nist.gov/fds/>.

Il materiale originale consta di tre elementi:

- FDS, *User Guide*, che costituisce la vera e propria guida all'utilizzo del programma;
- FDS, *Technical Reference Guide*, che raccoglie l'impostazione matematica e gli algoritmi implementati all'interno del codice di calcolo;
- *Smokeview User Guide*, che rappresenta la guida all'utilizzo del programma Smokeview per il post-processo dei risultati ottenuti con FDS.

La presente guida intende essere un riassunto degli argomenti principali contenuti all'interno dell'intera documentazione originale: il materiale è stato riordinato in modo da dare maggiore organicità ai vari contenuti, raggruppando, ad esempio, tutti i comandi aventi la medesima funzionalità nello stesso capitolo ed evitando di soffermarsi su aspetti troppo tecnici che si è ritenuto avrebbero finito per scoraggiare chi si stia interessando all'utilizzo di FDS.

Per permettere al lettore di abituarsi alla sintassi del programma, il testo propone numerosi esempi di righe di input come quella che segue:

```
&TIME TWFIN = 600.0 T_BEGIN=0.0 DT=0.5 /
```

Il carattere maiuscolo e il *font* diverso rispetto al testo denoteranno cioè una riga propria del linguaggio di FDS; tale riga potrà essere copiata in un file di input per verificarne in modo immediato l'effetto conseguente.

Inoltre, laddove vi sia un particolare della sintassi cui si intende richiamare l'attenzione del lettore, questo comparirà sottolineato, come riportato nell'esempio seguente:

```
&SURF ID          = 'PAVIMENTO'
  COLOR           = 'GRAY'
  TMP_FRONT     = 13 /
```

Una doverosa precisazione circa la convenzione utilizzata nel testo per la separazione decimale: dato che si è fatto ampio ricorso alla sintassi propria di FDS e utilizzando il software il punto (.) come separatore decimale, si è preferito adottare la medesima convenzione nella stesura della presente guida.

Il testo e tutti gli esempi che vi compaiono sono stati redatti facendo riferimento alla versione 5.3 del programma; laddove necessario, sono inoltre stati aggiunti dei rimandi alla versione 5.4 dello stesso.

Gli autori ringraziano sin d'ora quanti segnaleranno eventuali imperfezioni e sottolineano che sia rilievi che critiche saranno inoltre ben accetti.

Introduzione all'ingegneria della sicurezza antincendio

2.1. LA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELL'INCENDIO SECONDO L'APPROCCIO INGEGNERISTICO

Con l'emanazione della direttiva 89/106/CEE concernente i prodotti da costruzione e la successiva pubblicazione del documento interpretativo del *Requisito n. 2 – Sicurezza in caso d'incendio*, si è avviato anche in Europa il processo di sviluppo delle tematiche inerenti la *Fire Safety Engineering* (ingegneria della sicurezza antincendio).

Si è iniziato ad affermare, in altre parole, il concetto di approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio quale metodo paritetico e alternativo all'approccio di tipo tradizionale basato sull'applicazione di regole tecniche che stabiliscono a priori, in maniera deterministica e vincolante, le misure di protezione da adottare.

La metodologia prestazionale secondo la norma ISO/TR13387 consiste nell'applicare – a partire da una valutazione prettamente scientifica dell'incendio e dei suoi effetti così come dell'agire umano – norme e principi di stampo ingegneristico finalizzati a salvaguardare le persone e i beni, a valutare da un punto di vista quantitativo i rischi d'incendio e dei relativi effetti e a definire analiticamente misure protettive, al fine di ridurre, entro certi livelli stabiliti, le conseguenze che un incendio può comportare.

Come si è accennato nell'introduzione, il decreto del Ministero dell'Interno del 9 maggio 2007 rappresenta l'atto amministrativo con cui l'approccio prestazionale è stato ufficialmente inserito nell'ordinamento nazionale nell'ambito dei procedimenti di prevenzione incendio. In base ad esso, il professionista, in accordo con il committente, può scegliere liberamente di adottare la metodologia prestazionale per attività non espressamente regolate da specifiche disposizioni antincendio, come pure nel corso dei procedimenti di deroga, allo scopo di individuare misure di sicurezza equivalenti.

L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio può essere organizzato nella seguente successione di fasi¹:

- analisi preliminare;
- analisi quantitativa;
- redazione del programma di gestione della sicurezza antincendio (SGSA).

2.1.1. Analisi preliminare (I fase)

L'analisi preliminare può essere riassunta nei punti che seguono.

Dovranno essere innanzitutto prese in considerazione le caratteristiche del progetto. L'individuazione dei dati caratteristici progettuali deve infatti tenere conto degli aspetti legati a:

- vincoli imposti da prescrizioni normative e da esigenze peculiari dell'attività;
- pericoli d'incendio connessi alla destinazione d'uso prevista per gli edifici e i locali;
- fattori ambientali specifici collegabili alle conseguenze dello sviluppo dell'incendio;
- caratteri e comportamenti delle persone presenti in relazione alla tipologia di edificio prescelta e alla destinazione d'uso prevista.

Il passo successivo riguarda la definizione degli obiettivi di sicurezza. L'identificazione di tali obiettivi va eseguita in conformità alle disposizioni in materia di prevenzione incendi e in relazione alle specifiche esigenze dell'attività in esame.

Tali esigenze possono comprendere i punti che seguono:

- le persone presenti devono essere in grado di lasciare l'opera o di essere soccorse altrimenti;
- deve essere presa in considerazione la sicurezza delle squadre di soccorso;
- la capacità portante dell'edificio deve essere garantita per un periodo di tempo prefissato in relazione all'evoluzione dell'incendio;
- la produzione e la propagazione del fuoco e del fumo all'interno delle opere deve essere limitata;
- la propagazione del fuoco alle opere vicine deve essere limitata.

In relazione agli obiettivi di sicurezza individuati, si devono poi indicare i parametri significativi presi a riferimento per garantire il soddisfacimento degli obiet-

¹ Le informazioni che seguono sono state tratte dalla "Lettera Circolare prot. DCPST/427 del 31 marzo 2008 relativa all'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio. Trasmissione delle linee guida per l'approvazione dei progetti e della scheda rilevamento dati predisposte dall'Osservatorio" cui si rimanda per i necessari approfondimenti.

tivi stessi. Tali parametri generalmente includono le temperature massime dei gas in ambiente, i livelli di visibilità, i livelli di radiazione termica, i livelli di concentrazione delle specie tossiche, i livelli minimi di ossigeno. Tale fase riguarda quindi la definizione dei cosiddetti livelli di prestazione.

Tutti i parametri utilizzati per rappresentare i livelli di prestazione devono essere opportunamente quantificati per mezzo di valori numerici, generalmente desunti dalla normativa tecnica internazionale o da specifiche disposizioni legislative. Al riguardo, si citano i seguenti riferimenti::

- BS 7974 (*Application of Fire Safety Engineering to the Building Design*);
- ISO/TR 13387 (*Fire Safety Engineering*);
- Decreto Ministero dei Lavori Pubblici del 9 maggio 2001 (*Requisiti minimi di sicurezza per aree interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante*).

Tabella 2.1. Valori di soglia raccomandati per visibilità, concentrazione dei prodotti di combustione e temperatura (Ferrari et al., 2003)

Parametro	Soglia di accettabilità
Temperatura ambiente	50°C
Livello di visibilità	9 m
Concentrazione di ossigeno	15 (%)
Anidride carbonica	0.5 (%)
Monossido di carbonio	80 ppm

L'individuazione di uno scenario di incendio si traduce nella schematizzazione degli eventi che possono ragionevolmente verificarsi in relazione alle caratteristiche individuate dell'incendio, dell'edificio e delle persone presenti. Il processo di selezione degli scenari d'incendio di progetto deve individuare, tra tutte le condizioni realisticamente ipotizzabili, le più gravose per lo sviluppo e la propagazione delle fiamme, la conseguente sollecitazione strutturale, la tutela delle persone presenti e la sicurezza delle squadre di soccorso².

Il termine *scenario* indica pertanto l'insieme di condizioni con riferimento alle quali si intende effettuare la simulazione.

Ogni scenario deve comprendere almeno le tre componenti che seguono:

- caratteristiche del fuoco: stato, tipo e quantitativo delle sostanze combustibili, loro disposizione e configurazione, profilo temporale del rilascio termico e picco di potenza termica sviluppata (HRR_{max} dove HRR sta per *Heat Release Rate*). In rapporto alla velocità di sviluppo, è possibile, ad esempio, caratteriz-

² Così si esprime, a proposito del processo di selezione degli scenari, l'ing. S. Marsella (CNVVF): "Il processo adottato dal D.M. 9 maggio 2007 si fonda sul *giudizio esperto* e investe la capacità professionale del valutatore e dell'organo di controllo; il processo adottato dalla norma NFPA 101 è basato invece sugli scenari predefiniti: questo solleva dalla responsabilità di decidere, ma comporta una applicabilità gravosa e non consente di svolgere analisi ritagliate sulla specificità dei singoli edifici". *Gli scenari d'incendio nel processo prestazionale*, Convegno I.S.A. "L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio", Roma, 6 Novembre 2007.

zare diversi modelli di incendio (detti rispettivamente a crescita lenta, media o veloce), prendendo a base della caratterizzazione il tempo necessario a raggiungere un rilascio termico pari a 1000 kW:

- incendio a crescita lenta: 1000 kW in 600 s;
 - incendio a crescita media: 1000 kW in 300 s;
 - incendio a crescita rapida: 1000 kW in 150 s;
 - incendio a crescita ultrarapida: 1000 kW in 75 s.
- caratteristiche dell'edificio: geometria dei locali, composizione e proprietà termiche delle pareti, degli arredi e delle tappezzerie, strutture edilizie, condizioni di ventilazione interna ed esterna, stato di apertura o chiusura di porte e finestre;
 - caratteristiche delle persone presenti: affollamento massimo, stato psico-fisico, presenza di disabili, familiarità con i luoghi, stato di veglia o sonno, ecc.

L'individuazione di uno scenario di incendio è il risultato del giudizio esperto formulato congiuntamente da progettista e autorità in merito alla ragionevolezza e alla realistica delle ipotesi assunte. Entrambe le condizioni risultano necessarie per restringere il numero di casi di studio dall'infinità di scenari ipotizzabili in riferimento a un edificio a quelli che effettivamente rappresentano le situazioni più pericolose per il fabbricato e i suoi occupanti in termini di possibili condizioni di innesco e di propagazione delle fiamme.

I possibili scenari individuati si aggiungono agli otto scenari descritti dalle norme NFPA 101 – *Life Safety Code* e NFPA 5000 – *Building Construction and Safety Code*, nei quali trovano collocazione, con possibilità di integrazione da parte del progettista, i vari problemi inerenti le vie d'esodo, la presenza di persone, la propagazione dell'incendio agli edifici adiacenti, le caratteristiche dei materiali combustibili e, le misure di protezione attiva e passiva.

Tali scenari predefiniti sono i seguenti:

- *scenario n. 1*: scenario tipico che considera le attività, il numero e la localizzazione degli occupanti, le dimensioni degli ambienti, la natura e l'entità degli arredi e degli altri elementi presenti, le proprietà dei materiali combustibili e delle possibili sorgenti di ignizione, le condizioni di ventilazione con specifica definizione del primo elemento che prende fuoco e la sua localizzazione;
- *scenario n. 2*: scenario che considera un incendio a sviluppo ultraveloce, ubicato in corrispondenza delle vie primarie di uscita con le porte interne aperte all'inizio dell'incendio;
- *scenario n. 3*: scenario con incendio che ha inizio in un ambiente normalmente non occupato e che potenzialmente può mettere in pericolo un grande numero di persone in un ampio ambiente limitrofo o in un'altra area dell'edificio;
- *scenario n. 4*: scenario con fuoco che ha origine a parete o a soffitto in posizione adiacente ad un ambiente con alta presenza di persone;
- *scenario n. 5*: scenario con fuoco che si sviluppa lentamente in posizione non coperta dai sistemi di protezione e in prossimità di una zona con rilevante presenza di persone;

- *scenario n. 6*: rappresenta lo scenario d’incendio più grave, derivante da un carico d’incendio più elevato di quello caratteristico del normale uso dell’edificio, a sviluppo rapido e con presenza di persone;
- *scenario n. 7*: scenario con incendio che si sviluppa al di fuori della zona d’interesse (incendio esterno) e che risulta suscettibile d’estendersi a quest’ultima, di bloccarne le uscite o di determinare condizioni interne non sostenibili;
- *scenario n. 8*: scenario d’incendio con fuoco avente origine in un ambiente o area dell’edificio d’interesse dato il malfunzionamento e/o la non presenza delle misure di protezione attive o passive in quanto messe fuori uso o disattivate singolarmente in sequenza.

2.1.2. Analisi quantitativa (II fase)³

Andranno individuate le soluzioni impiantistiche più adatte per coniugare le caratteristiche della tipologia edilizia oggetto del progetto agli obiettivi di sicurezza propri dei livelli di prestazione stabiliti.

La scelta tra le varie soluzioni progettuali verrà condotta per mezzo di un’analisi quantitativa che culminerà con il giudizio in merito all’accettabilità dell’ipotesi considerata.

L’applicazione di un modello di calcolo fornirà una serie di parametri numerici utili alla descrizione dell’evoluzione dell’incendio e le indicazioni necessarie per verificare il soddisfacimento dei livelli di prestazione prefissati. In questa fase, si procederà ad un’ottimizzazione delle scelte progettuali effettuate, scartando quelle che risultino poco soddisfacenti e affinando quelle che siano risultate più valide sotto il profilo della sicurezza.

2.1.2.1. Modelli di calcolo dedicati alla simulazione di un incendio

Un aspetto cruciale legato all’analisi quantitativa riguarda la scelta dei modelli di calcolo per la previsione della sequenza temporale delle varie fasi in cui si articola l’evoluzione dell’incendio ipotizzato, date le contromisure, di tipo attivo e passivo, previste. I modelli di simulazione permettono di comprendere il livello di rischio attuale e di predisporre diverse modalità di gestione del livello di pericolo presente.

³ Quanto di seguito esposto in merito all’analisi quantitativa è desunto in massima parte dalle memorie presentate al Convegno Istituto Superiore Antincendi – ISA (*L’approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*, Roma, 6 Novembre 2007) dai seguenti relatori:

- ing. L. Nassi, CNVVF - direttore vice dirigente Comando provinciale di Siena;
- ing. M. Caciolai, CNVVF - direttore vice dirigente DCPST - Area protezione passiva;
- ing. A. Leonardi, libero professionista, specialista in fluidodinamica degli incendi;
- ing. S. Pustorino, libero professionista, coordinatore della Commissione Sicurezza in caso di incendio delle costruzioni in acciaio.

La scelta del modello di calcolo dipenderà dalla complessità del progetto da analizzare e dal livello di conoscenze tecniche acquisite.

La traduzione in termini matematici dell'evoluzione di un incendio per mezzo della scrittura di un sistema di equazioni costituisce il modello alla base di un codice di calcolo. Tale codice avrà quindi come compito il calcolo automatico dell'evoluzione e della successione degli eventi, data una serie di informazioni fornite dall'utente.

Vanno dapprima definite estensione e geometria della regione di interesse, cioè della porzione di spazio che andrà a costituire il dominio di calcolo. Devono quindi essere stabilite le caratteristiche termo-fisiche e chimiche dei materiali che faranno parte del dominio individuato.

Vi è poi la fase di discretizzazione: l'intero volume prescelto sarà suddiviso in elementi più piccoli, celle o sotto volumi, in corrispondenza dei quali sarà imposta la soluzione matematica delle equazioni che descrivono il problema oggetto di indagine. In base a come venga realizzata quest'ultima fase, è possibile operare una classificazione dei codici di calcolo dedicati alla prevenzione incendi rispettivamente in due categorie:

- modelli a zona;
- modelli a campo.

I modelli di simulazione a zone prevedono la suddivisione del locale sede dell'incendio in due macro volumi di controllo. Uno superiore contenente i prodotti della combustione; il secondo, più basso, rappresentante invece l'aria a condizioni ambiente. Ad una determinata altezza dal pavimento sarà presente un'interfaccia con una variazione a gradino della temperatura dell'aria in corrispondenza ad essa. All'interno di ciascuno dei due volumi descritti, questo tipo di modelli assume infatti l'uniformità nello spazio delle grandezze di interesse (ad esempio, temperatura e concentrazione di specie tossiche) previste durante le fasi di evoluzione dell'incendio. A riguardo dei modelli a zone, si ricorda la disponibilità gratuita del simulatore CFAST all'indirizzo internet: <http://cfast.nist.gov/>.

I modelli fluidodinamici (CFD) prevedono la rappresentazione degli ambienti oggetto di indagine mediante la costituzione di un dominio di calcolo suddiviso in un gran numero di celle e la soluzione per via numerica delle leggi di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia, in corrispondenza a ciascun volume di controllo. La peculiarità di questo tipo di modelli sta nella capacità di fornire combinatamente la variazione nel tempo e nello spazio delle grandezze di interesse.

2.1.3. Programma di gestione della sicurezza antincendio (SGSA)

L'adozione della metodologia prestazionale è connessa all'obbligo di elaborare un documento contenente il programma per l'attuazione del sistema di gestione

della sicurezza antincendio (denominato SGSA). Tale documento risulta necessario per tenere sotto controllo tutti i parametri che hanno portato all'individuazione degli scenari di incendio, dato che questi rappresentano vincoli e limitazioni imprescindibili per l'esercizio dell'attività.

L'elaborazione di tale documento rappresenta un elemento di assoluta novità rispetto agli obblighi di gestione precedentemente stabiliti⁴ e diventa uno degli adempimenti fondamentali a cui vengono ad essere assoggettate le attività trattate con l'approccio ingegneristico.

Nel documento devono essere compresi tutte le ipotesi assunte relativamente a:

- organizzazione del personale;
- identificazione e stima dei pericoli derivanti dalle attività svolte;
- controllo operativo;
- gestione delle modifiche;
- pianificazione delle emergenze;
- controllo delle prestazioni.

È previsto che, qualora l'esito degli accertamenti periodici condotti dall'autorità preposta (CNVVF) rilevi che non sono stati rispettati e mantenuti gli impegni assunti, si debba procedere alla sospensione del certificato di prevenzione incendi (CPI).

La motivazione di tale disposizione si desume dal fatto che la metodologia prestazionale, basandosi sull'individuazione di misure di protezione effettuata con riferimento a specifiche condizioni, necessita di un attento mantenimento dei parametri sia degli scenari che dei progetti affinché non si verifichi una riduzione nel tempo del livello di sicurezza.

2.1.4. Sviluppo progettuale e documentazione finale

Lo sviluppo progettuale deve essere condotto in modo da ottenere risultati finali (capacità di prestazione) che, confrontati e verificati in base ai requisiti iniziali (richieste di prestazione), soddisfino i livelli di prestazione attesi (grado di sicurezza).

L'eventuale scelta da parte di committente e professionista di ricorrere all'approccio ingegneristico per l'approvazione di un progetto o delle misure compensative in una domanda di deroga comporta l'obbligo aggiuntivo di presentare una documentazione integrativa rispetto a quella prevista dal decreto del Presidente della Repubblica 37/98 (e dal suo Decreto attuativo del Ministero dell'Interno del 4 maggio 1998), il cui contenuto si può riassumere in quanto segue.

⁴ Si veda in proposito quanto stabilito nel D.P.R. 37 del 12 gennaio 1998 all'art. 5 – *Obblighi connessi con l'esercizio dell'attività.*

- sommario tecnico: deve contenere il percorso logico seguito per l'individuazione di:
- scenario d'incendio di progetto;
- obiettivi di sicurezza e livelli di prestazione;
- relazione tecnica: deve esprimere in forma esaustiva ed efficace le modalità di calcolo adottate per descrivere il comportamento del sistema in merito al tipo di analisi condotta. Dovrà quindi contenere:
 - modello di simulazione o algoritmo di calcolo;
 - assunzioni, dati d'ingresso, risultati, valutazioni.
- elaborati grafici (disegni, schemi grafici e immagini);
- piano di gestione della sicurezza antincendio (SGSA).

2.1.5. La novità dell'approccio prestazionale

Si ritiene opportuno concludere questa breve introduzione relativa all'approccio ingegneristico nella progettazione della sicurezza antincendio riportando quanto espresso in proposito dall'ing. G. Giomi, vicedirettore centrale per la prevenzione e sicurezza tecnica del Corpo Nazionale dei Vigili del fuoco (CNVVF):

“Lo strumento prestazionale è certamente una novità e come tutte le novità induce e genera pareri contrastanti: gli estimatori ritengono che sia l'unico modo per risolvere situazioni altrimenti irrisolvibili; gli scettici, al contrario, pensano che questa metodologia possa comportare incertezza, determinare contenzioso e far perdere di credibilità alle regole tecniche in vigore.

I detrattori addirittura si spingono ad ipotizzare che l'approccio prestazionale potrà diventare facilmente lo strumento per eludere elegantemente le normative in vigore individuando percorsi per così dire a minor resistenza, con il pericolo di ridurre drasticamente il livello di sicurezza.

Ritengo che più che condividere o rigettare tali considerazioni si debba ragionare in modo pragmatico, scevri da preconcetti e condizionamenti.

Il processo di valutazione prestazionale è una disciplina riconosciuta a livello internazionale che sempre più andrà affermandosi nell'attività di progettazione”⁵.

⁵ Convegno I.S.A., *L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*, Roma, 6 Novembre 2007.

Il software FDS

3.1. GENERALITÀ

FDS è un programma di fluidodinamica computazionale specificatamente dedicato all'analisi del moto dell'aria determinato da effetti termici.

Il programma risolve numericamente una forma delle equazioni di Navier-Stokes dedicata alla soluzione di flussi a bassa velocità generati da gradienti termici, con particolare riguardo ai fenomeni di trasporto di calore e di fumo tipici degli incendi. La formulazione delle equazioni e gli algoritmi di soluzione numerica sono illustrati nella documentazione tecnica che accompagna l'installazione del programma (nel caso di installazione predefinita la cartella che contiene tutta la documentazione è la seguente: *C:\Programmi\NIST\FDS\Documentation*). All'interno sarà possibile trovare, tra l'altro, il documento intitolato "*FDS_5_Technical_Reference_Guide*") a cui ci si dovrà riferire per avere un dettaglio più approfondito dei principi teorici e delle metodologie di calcolo implementate.

Smokeyview è il programma di visualizzazione che permette la resa grafica dei risultati della simulazione (si veda il capitolo 17).

3.2. CARATTERISTICHE DI FDS

È opportuno sapere che FDS ha iniziato ad essere ufficialmente disponibile a partire dal febbraio 2000 (versione 1). Nel seguito, si farà esclusivo riferimento alla "versione 5", introdotta nell'ottobre 2007. Tutte le considerazioni riportate sono state derivate dalla guida originale del NIST, con riferimento all'esecuzione del programma su postazione pc singola.

Ad oggi, circa il 50% delle applicazioni è stato riservato alla progettazione e alla verifica di dispositivi di evacuazione fumo e calore o agli studi di attivazione di sprinkler o rivelatori di allarme. Il restante 50% delle applicazioni ha riguardato investigazioni su incendi reali in edifici civili e industriali.

3.2.1. Modello fluidodinamico

FDS risolve numericamente una forma delle equazioni di Navier-Stokes sviluppata per la soluzione di moti a bassa velocità generati da gradienti termici, con particolare riguardo ai fenomeni di trasporto di calore e di fumo tipici degli incendi. L'algoritmo di calcolo è basato su un metodo di soluzione del tipo *predictor-corrector*, con accuratezza del secondo ordine con riferimento al tempo e allo spazio.

La modellazione della turbolenza viene eseguita utilizzando il metodo LES (*Large Eddy Simulation*), secondo il modello proposto da Smagorinsky. Se le celle della mesh di calcolo sono sufficientemente fitte, è possibile eseguire una simulazione anche in modalità DNS (*Direct Numerical Simulation*), procedendo quindi alla soluzione diretta delle equazioni di Navier-Stokes senza alcun modello di turbolenza.

3.2.2. Modello di combustione

Per la maggior parte delle applicazioni, FDS assume una reazione di combustione a singolo stadio; le specie chimiche coinvolte nella reazione vengono calcolate in base ad un modello a frazione di miscela. La frazione di miscela è una quantità scalare che permette di determinare le frazioni di massa dei costituenti la fase fluida in ciascun punto del dominio di calcolo. La frazione di miscela (Z) è una funzione dello spazio e del tempo che indica la frazione di massa del fluido presente legata al flusso di combustibile. $Z = 1$ rappresenterà la condizione di combustibile puro. $Z = 0$ corrisponderà invece alle condizioni di aria pura. Il modello a frazione di miscela implementato all'interno del software prevede l'impiego di due o tre parametri. Da tali parametri è possibile ricavare le frazioni di massa dei reagenti e dei prodotti della combustione in base a relazioni note come *relazioni di stato*. Nel caso di frazione di miscela a due parametri, i due termini in questione saranno dati dalla frazione di massa del combustibile che non ha ancora partecipato alla combustione e dalla frazione di massa dei prodotti della combustione. È però possibile modellare anche reazioni a due stadi (come la reazione che rappresenta l'ossidazione del combustibile in monossido di carbonio e la successiva ossidazione di questo in anidride carbonica). In questo caso, il modello a frazione di miscela utilizza tre parametri: il primo rappresenta il combustibile che non ha reagito, il secondo la frazione di combustibile che ha completato il primo stadio della reazione (formazione del monossido di carbonio) e il terzo la frazione di massa del combustibile che ha ultimato l'ultimo stadio della reazione (l'eventuale ossidazione del monossido di carbonio in anidride carbonica).

3.2.3. Calcolo dello scambio termico per irraggiamento

Il calcolo del flusso termico scambiato per irraggiamento è incluso nel modello attraverso la soluzione dell'equazione di trasporto della radiazione, data l'ipotesi di gas come corpo grigio. Per alcune applicazioni è possibile impiegare anche un modello multibanda. Lo scambio radiante viene risolto usando una tecnica simile al metodo dei volumi finiti per i fenomeni di trasporto convettivo e, pertanto, in riferimento al calcolo dell'irraggiamento, si parla di metodo FVM (*Finite Volume Method*).

Utilizzando 100 angoli solidi per la discretizzazione del dominio, il costo computazionale del calcolo dell'irraggiamento rappresenta circa il 20% delle risorse totali della CPU (*Central Processing Unit*¹). Le particelle di liquido partecipano allo scambio radiante attraverso i meccanismi di assorbimento e diffusione (*scattering*) della radiazione termica (tale aspetto risulta importante per le simulazioni che riguardano l'attivazione di dispositivi sprinkler). I coefficienti di assorbimento e diffusione vengono calcolati in base alla teoria di Mie.

3.2.4. Geometria

Il sistema di equazioni alle derivate parziali che regola la fluidodinamica richiede, fatta eccezione per casi molto semplici, che il dominio di calcolo, cioè la porzione di spazio che si intende simulare, sia suddiviso in elementi più piccoli, chiamati *celle*. L'insieme di tali celle prende il nome di *griglia di calcolo*. FDS utilizza una griglia di calcolo di tipo cartesiano e la modellazione degli oggetti deve essere coerente con la sottostante griglia di calcolo.

3.2.5. Calcolo multi-griglia

Con il software FDS è possibile l'impiego di più di una singola griglia di calcolo per la descrizione del dominio oggetto della simulazione.

3.2.6. Processo di calcolo parallelo

È disponibile la modalità di esecuzione di una simulazione in parallelo su più computer ricorrendo ad un opportuno protocollo di comunicazione per computer denominato *MPI* (*Message Passing Interface*).

¹ La CPU indica il dispositivo cui spetta il compito di eseguire le istruzioni di un particolare programma.

3.2.7. Condizioni al contorno

A tutte le superfici solide possono essere assegnate condizioni al contorno di tipo termico, oltre alle informazioni che specificano il comportamento al fuoco dei materiali costituenti. Gli scambi di massa e calore in corrispondenza delle varie superfici vengono calcolati in base a relazioni di tipo empirico. Eseguendo la simulazione in modalità DNS (*Direct Numerical Simulation*), è possibile la risoluzione diretta di tali fenomeni.

3.3. CARATTERISTICHE INNOVATIVE DI FDS5

Le maggiori differenze di FDS5 rispetto alle versioni precedenti riguardano la modellazione delle superfici solide e della combustione. Sono state introdotte inoltre nuove funzionalità, come, ad esempio, quella riguardante la possibilità di analizzare le cosiddette *zone pressione*.

3.3.1. La modellazione della combustione

I miglioramenti più importanti inerenti al modello di combustione riguardano il calcolo più accurato del rilascio termico e la trattazione dei fenomeni locali di estinzione della fiamma.

Inoltre, il modello di calcolo è stato arricchito per poter tenere conto della formazione e dell'eventuale successiva ossidazione in anidride carbonica del monossido di carbonio.

3.3.2. La stratigrafia delle superfici solide

Le precedenti versioni di FDS presupponevano che le superfici solide fossero costituite da un unico materiale. In FDS5, invece, tali superfici possono essere modellate con più strati di materiali diversi. Le caratteristiche di ogni materiale vanno specificate tramite un nuovo gruppo lista, chiamato **MATL**.

3.3.3. Le zone pressione

È possibile assegnare a delle porzioni del dominio di calcolo una pressione di fondo diversa da quella ambiente, in modo da consentire la simulazione dei fenomeni legati alla permeabilità all'aria delle pareti di un compartimento o la definizione delle curve caratteristiche dei ventilatori.

3.3.4. L'interfaccia con modelli strutturali

All'interno del software è stata introdotta inoltre una grandezza d'uscita (**ADIA-**

BATIC_SURFACE_TEMPERATURE) per consentire l'impiego dei risultati di FDS5 in modelli di analisi strutturale.

3.3.5. Verifica e validazione dei casi

A partire da FDS5, maggiore attenzione è stata posta sul mantenimento di una collezione permanente di verifica (*verification*) e validazione (*validation*) di casi di studio. Ciò fornisce agli utenti una serie di dati per verificare il corretto impiego di FDS, potendo confrontare i risultati ottenuti a quelli pubblicati².

Inoltre, ciò migliora la qualità di ogni aggiornamento di FDS, dato che verrà utilizzata un'apposita procedura di verifica per accertarsi che ogni modifica del codice sorgente non entri in conflitto con i risultati precedentemente ottenuti.

² Il materiale relativo ai casi di studio è consultabile all'indirizzo: http://fire.nist.gov/fds/verification_validation.html.