

**STABILIMENTO ILVA DI TARANTO**  
**DEPOSITO FOSSILI**

**RELAZIONE TECNICA DI VALUTAZIONE DEGLI OBIETTIVI DI SICUREZZA CON ANALISI PRESTAZIONALE**

**Relazione Tecnica**

**Ai sensi del D.M. 9 maggio 2007**

## Sommario

1	Scheda informativa generale .....	3
1.1	Individuazione dei responsabili.....	3
1.2	Finalità per le quali è applicato il metodo ingegneristico:.....	3
2	Analisi Preliminare .....	3
2.1	Definizione del Progetto .....	3
2.1.1	Premessa.....	3
2.1.2	Descrizione delle condizioni ambientali.....	3
2.2	Identificazione degli obiettivi di sicurezza antincendio.....	5
2.3	Identificazione dei livelli di prestazione.....	5
2.4	Identificazione degli scenari di incendio.....	5
2.4.1	Premessa.....	5
2.4.2	Incendio di progetto .....	5
2.4.3	Caratteristiche dell'edificio e degli impianti.....	10
2.4.4	Caratteristiche degli occupanti.....	11
2.4.5	Scenari di incendio di progetto.....	11
3	Analisi Quantitativa.....	11
3.1	Calcolo della Temperatura.....	11
3.1.1	Premessa.....	11
3.1.2	Scelta del modello utilizzato.....	11
3.1.3	Principali scelte progettuali della simulazione.....	13
3.1.4	Analisi di sensitività del software .....	16
3.1.5	Verifica del software.....	19
3.1.6	Analisi dei risultati .....	23
3.2	Rapporto dei dati con gli obiettivi di sicurezza .....	27
3.3	Conclusioni.....	28

# 1 Scheda informativa generale

## 1.1 Individuazione dei responsabili

Responsabile dell'attività	
Responsabile della progettazione antincendio generale	Ing. Giorgio Ravera - ETEA SICUREZZA S.r.l. Elenco M.I. CN00020I00346B
Responsabile della progettazione con metodo ingegneristico	Ing. Tiziano Zuccaro - ISAQ Studio S.r.l. Elenco M.I. AN00973I00201

## 1.2 Finalità per le quali è applicato il metodo ingegneristico:

L'approccio Ingegnistico viene applicato allo scopo di analizzare i seguenti aspetti:

- valutazione dei valori di temperatura massima, al fine di verificare se tali temperature costituiscono un significativo rischio in ordine alla resistenza al fuoco della struttura,
- valutazione della diffusione dei fumi (in maniera specifica l'altezza rispetto al piano di campagna) per verificare le implicazioni in relazione all'evacuazione degli occupanti ed all'ingresso delle squadre di emergenza

# 2 Analisi Preliminare

## 2.1 Definizione del Progetto

### 2.1.1 Premessa

L'attività oggetto dello studio è il complesso industriale ILVA TARANTO, nella fattispecie la copertura del **PARCO FOSSILI**.

### 2.1.2 Descrizione delle condizioni ambientali

Il capannone per la copertura del parco FOSSILI è costituito da una struttura piuttosto semplice. Essa si articola su un'unica campata ad arco, lunga circa 710 m rispetto un asse est-ovest, larga circa 253 m alla base e 264 m nel punto più largo (asse nord-sud), e alta circa 78 m al colmo dell'arcata. La superficie complessiva coperta analizzata è pari a circa di 179.630 m<sup>2</sup>. Nelle figure che seguono (da 1 a 3) si illustra il modello tridimensionale realizzato per questo studio.

Smokeview 5.5.3 - Apr 5 2010

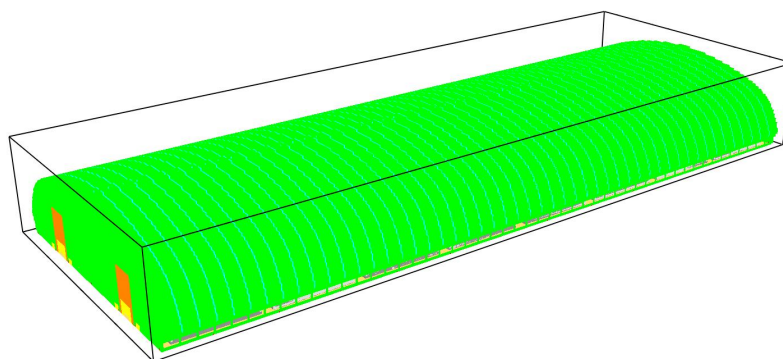
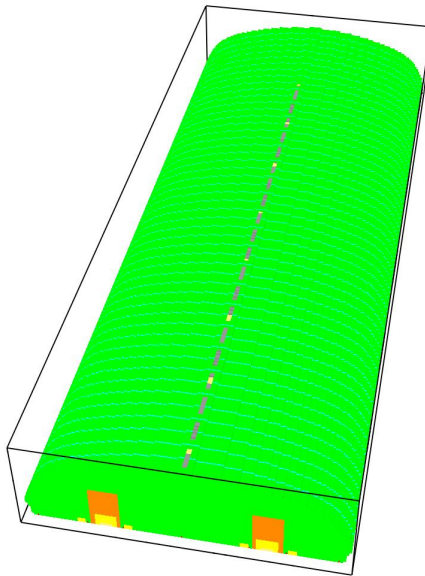
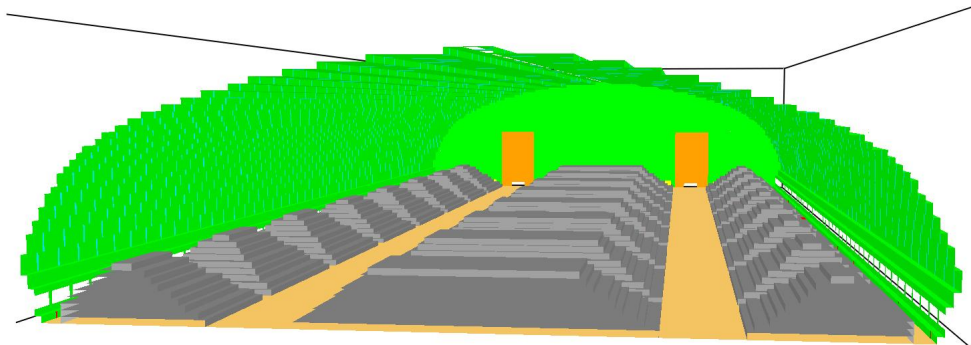


Figura 1: Modello 3D utilizzato per la simulazione – Vista esterna asse est-ovest



**Figura 2: Modello 3D utilizzato per la simulazione – Vista esterna asse nord-sud**



**Figura 3: Modello 3D utilizzato per la simulazione – Vista interna**

Le strutture del fabbricato sono così realizzate:

- Il manto di copertura ed il tamponamento è costituito da pannelli in lamiera;
- struttura portante realizzata con elementi reticolari in acciaio;
- presenza di lucernai in policarbonato per l'illuminazione naturale, posti a intervalli regolari lungo tutto lo sviluppo longitudinale della struttura
- presenza di aperture dotate di serranda ricavate alla base delle pareti laterali e camini sulla sommità della struttura dotati di un "labirinto" per fermare e raccogliere le polveri, il tutto in grado di consentire un efficace ricambio d'aria ambiente per convezione naturale.

Le serrande alla base sono costituite da 298 elementi di dimensioni pari a 200 cm x 400 cm (h), mentre i camini (aeratori) posti in sommità sono costituiti da 25 elementi larghi 7,50 m e lunghi 20 m.

All'interno della struttura saranno depositati minerali di tipo fossile che saranno movimentati/trattati sia con macchine operatrici specifiche, sia tramite dei nastri trasportatori posizionati a livello di campagna. Nello studio, in favore della sicurezza non si prende in esame l'intervento di alcun sistema di protezione specifica.

## 2.2 Identificazione degli obiettivi di sicurezza antincendio

Gli obiettivi del seguente progetto ingegneristico sono quelli verificare le condizioni che si vengono a creare all'interno della struttura al fine di supportare le conclusioni del progetto di prevenzione incendi.

Nello specifico si andranno ad analizzare:

- i valori di temperatura derivanti dallo scenario di incendio stabilito nei paragrafi successivi per verificare le possibili conseguenze in termini di resistenza delle strutture in caso di incendio
- l'andamento dei fumi in relazione alle possibili problematiche di esodo

Infatti il materiale immagazzinato all'interno del deposito è costituito da minerali fossili (carbone, coke, ecc.) in quantità considerevoli (diverse centinaia di migliaia di tonnellate) che risultano pertanto costituire il principale pericolo di incendio.

All'interno saranno poi presenti anche macchinari (operatrici, mezzi di trasporto, nastri trasportatori) che vengono considerati un pericolo di incendio minore sia per le strutture, sia per gli occupanti rispetto a quello costituito dalla presenza dei fossili. Per definire lo scenario di incendio preso in considerazione si faccia quindi riferimento ai paragrafi successivi

## 2.3 Identificazione dei livelli di prestazione

Il livello di prestazione da raggiungere per la garanzia di rispetto dell'obiettivo proposto è il seguente:

1. la curva tempo-temperatura naturale sia tale da non creare criticità alla struttura portante per il tempo necessario alla gestione dell'emergenza ( $T_{max} < 450-500 \text{ °C}$ ).
2. L'altezza dei fumi non costituisca un pericolo per i presenti ( $h_{fumi} > 2,00 \text{ m}$ )

Nello specifico tali valori saranno valutati localmente, tramite una rete di elementi di rilevazione meglio descritte nei paragrafi successivi. Infatti le dimensioni della struttura risultano talmente ampie da poter considerare l'incendio in maniera del tutto simile ad un incendio all'aperto, e quindi risulta del tutto ragionevole ipotizzare che un ipotetico incendio non possa andare a determinare condizioni estese all'intero ambiente.

## 2.4 Identificazione degli scenari di incendio

### 2.4.1 Premessa

Per gli scenari di incendio sono stati analizzati seguenti parametri:

- 1- incendio di progetto
- 2- caratteristiche dell'edificio e degli impianti
- 3- caratteristiche degli occupanti

### 2.4.2 Incendio di progetto

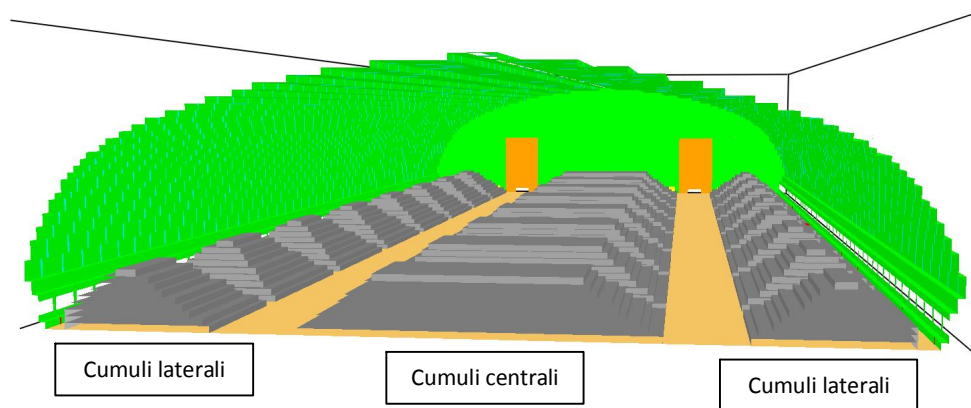
La scelta dell'incendio di progetto è stata guidata dalle seguenti considerazioni:

- 1- individuazione dei principali elementi combustibili ed infiammabili presenti negli ambienti che, per caratteristiche legate al quantitativo, alla difficoltà di intervento in tempi rapidi e ubicazione in prossimità di elementi strutturali possano essere particolarmente gravosi.

a) *Materiali infiammabili - combustibili presenti*

All'interno del deposito non saranno presenti quantitativi apprezzabili di materiale infiammabile. Potranno invece essere presenti mezzi per il trasporto e la lavorazione del minerale fossile che, per le considerazioni già riportate al paragrafo 2.2 non vengono presi in esame nel presente studio. Il quantitativo di materiale combustibile presente è invece estremamente elevato (diverse centinaia di migliaia di tonnellate di combustibili fossili quali carbone, coke, ecc.). Il materiale sarà immagazzinato in cumuli come meglio illustrato in fig. 4: una serie di cumuli che definiremo "centrali" data la loro posizione rispetto all'asse trasversale della struttura, e due serie di cumuli che definiremo "laterali", posti in maggiore vicinanza alle pareti nord e sud. I cumuli sono separati da corridoi di dimensioni pari a circa 20-25 m, necessari per gli spostamenti dei mezzi e delle macchie operatrici.

Smokeview 5.5.3 - Apr. 5 2010



**Figura 4: Modello 3D utilizzato per la simulazione – Cumuli di materiale fossile**

Sulla base della descrizione appena riportata, risulta pertanto poco credibile uno scenario di incendio che coinvolge l'intero quantitativo di combustibile.

Molto più credibile è invece uno scenario di incendio che si origina in un punto di uno dei cumuli di minerale fossile e che da quel punto coinvolgerà una certa superficie del cumulo stesso.

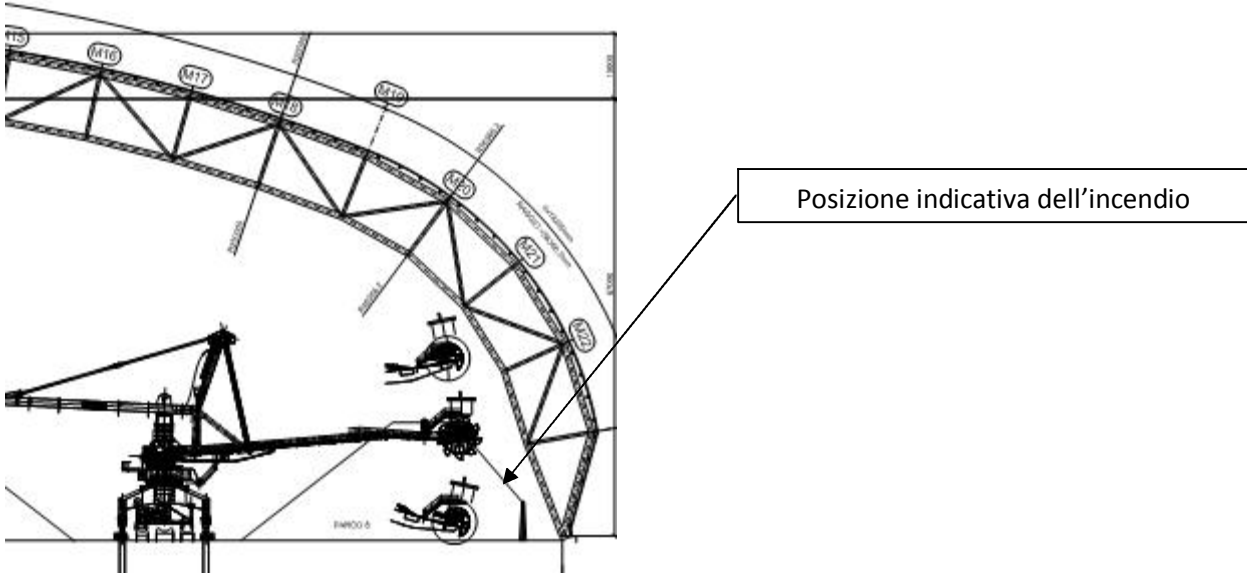
A tale proposito si consideri che il minerale fossile stoccato è caratterizzato di per sé da una combustione di tipo lento.

A questo si aggiungano anche le peculiari modalità di stoccaggio che prevedono la compattazione del materiale e l'impiego di sostanze filmanti spruzzate sulla superficie dei cumuli al fine di limitare la produzione di polveri, fattori che riducono ulteriormente la propensione alla combustione del materiale.

**Sulla base di quanto indicato si considera quindi materiali uno scenario di incendio che coinvolge parzialmente uno dei cumuli laterali. Date le caratteristiche tecniche e gestionali dell'attività si ritiene congruente uno studio effettuato su un incendio che coinvolge una superficie pari a 10 x 10 m (100 m<sup>2</sup>)**

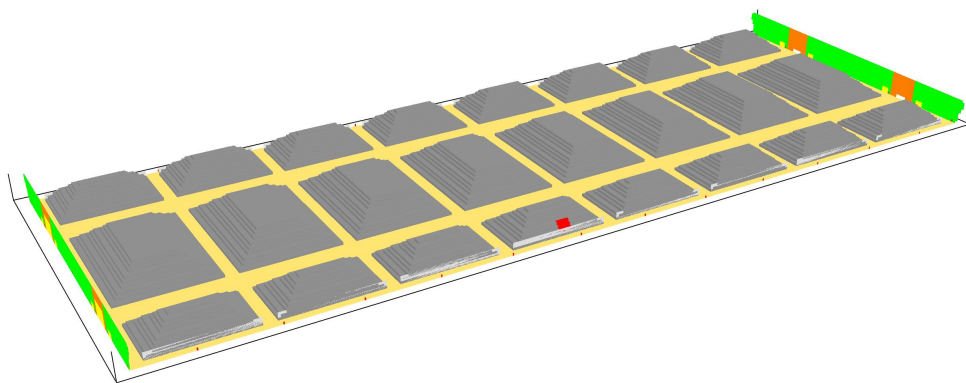
*b) Ubicazione e condizioni di ventilazione*

L'ubicazione dell'incendio viene scelta in modo da poter considerare le peggiori condizioni in termini di alimentazione dell'incendio e di vicinanza alle strutture portanti e alle uscite di sicurezza poste nelle vicinanze. Pertanto si opta per uno dei cumuli laterali in posizione centrale rispetto all'asse est ovest (cfr. fig. 5.a e 5.b). Si noti che il concetto di "vicinanza" nel caso specifico assume un valore relativo. Infatti le dimensioni della struttura sono talmente ampie che gli elementi strutturali più vicini all'incendio si trovano ad almeno 10 m di distanza.



**Figura 5.a: posizione indicativa incendio di progetto rispetto alla sezione**

Disegnato 11 - 02/12/2010



**Figura 5.b: posizione indicativa incendio di progetto rispetto al modello tridimensionale**

Di seguito si illustra il frammento di codice dal quale è possibile evincere la posizione dell'incendio:

```
INCENDIO
&OBST XB=307.0,317.0,8.0,10.0,6.0,8.0 SURF_ID='Incendio' /
&OBST XB=307.0,317.0,6.0,8.0,4.0,6.0 SURF_ID='Incendio' /
&OBST XB=307.0,317.0,10.0,12.0,8.0,10.0 SURF_ID='Incendio' /
```

In relazione alla ventilazione, i portoni vengono considerati chiusi. L'afflusso d'aria per la combustione (condizione conservativa) è comunque garantito grazie alla presenza delle griglie di ventilazione alla base della copertura e degli aeratori in sommità alla stessa.

In particolare si ipotizzano le seguenti condizioni per quanto attiene le griglie laterali e gli aeratori.

Dai dati ricevuti sono presenti 298 serrande (149 per lato) alla base della struttura di dimensioni pari a 2 x 4 m (h) cadauna per complessivi 2384 m<sup>2</sup>. Esse sono state assimilate a 50 elementi singoli lunghi 12 m e alti 4 m (25 elementi per lato per complessivi 2.400 m<sup>2</sup>).

A vantaggio di sicurezza le serrande sono considerate aperte e non si è presa in considerazione alcuna riduzione dell'efficienza di immissione dell'aria in relazione alla presenza di lamelle.

Per gli aeratori posti in sommità si considera invece che la presenza del sistema per l'abbattimento dell'emissione di polveri (griglia a labirinto interna) ne riduca l'effettiva superficie del 50%

Pertanto i 25 aeratori, con dimensioni effettive pari a 7,50 x 20 m (150 m<sup>2</sup> cadauno), sono stati assimilati a una superficie efficace di 4 x 19 m (76 m<sup>2</sup> cadauno, pari al 50,7% della superficie iniziale).

*Tasso di crescita del rilascio termico e picco della potenza termica (HRR<sub>max</sub>);*

In un locale delle dimensioni del parco FOSSILI lo sviluppo dell'incendio non è controllato – come accade per la maggior parte dei locali chiusi – dalla superficie di ventilazione presente.

Infatti la volumetria garantisce la disponibilità di grandi quantità di comburente. Inoltre le griglie laterali per la ventilazione naturale e la presenza dei camini in sommità, fanno sì che la combustione proceda come se avvenisse in pratica all'aperto, dove la velocità di combustione massima raggiunta è limitata solamente dalla quantità e tipologia di combustibile.

In questi casi il valore della potenza termica (Heat Release Rate - HRR) rilasciata dall'incendio può essere calcolato noto il combustibile presente e la velocità di combustione del materiale stesso (**burn rate**).

**L'analisi relativa all'incendio di progetto verrà quindi realizzata – come indicato nel punto 2.4.2 - studian- done lo sviluppo in relazione a una produzione di potenza termica per unità di superficie (HRRPUA) pari a 100 m<sup>2</sup>**

La letteratura tecnica disponibile propone dei ratei di combustione pari a 0,011 kg m<sup>2</sup>/sec per materiali quali il legno (FONTE : Ingegneria della sicurezza antincendio – A. La Malfa –Legislazione Tecnica Ed.), che vengono presi come primo riferimento.

In favore della sicurezza si considera per il minerale fossile un rateo doppio pari a 0,022 kg m<sup>2</sup>/sec. Considerando il potere calorifico carbone pari a 30 MJ/kg, si ottiene una potenza termica (HRR) per unità di superficie (HRR PUA) pari a:

$$0,022 * 30 = 0,66 \text{ MW/m}^2$$

Moltiplicando tale potenza per unità di superficie per la superficie complessiva si ottiene un valore pari a.

$$0,66 * 100 \text{ m}^2 = 66 \text{ MW}$$



Nella prima fase dell'incendio la potenza termica rilasciata è caratterizzata da una crescita più o meno rapida, che segue un andamento di tipo quadratico  $Q = \alpha \cdot t^2$ , dove Q è la potenza termica rilasciata, t è il tempo trascorso ed  $\alpha$  è un coefficiente di crescita che assume diversi valori a seconda della velocità di combustione caratteristica delle sostanze coinvolte nell'incendio.

I valori di  $\alpha$  stabiliti dalla letteratura internazionale sono i seguenti:

0,002778 KJ/s<sup>3</sup> per incendi velocità di combustione BASSA

0,0111 KJ/s<sup>3</sup> per incendi velocità di combustione MEDIA

0,0444 KJ/s<sup>3</sup> per incendi velocità di combustione VELOCE

0,1777 KJ/s<sup>3</sup> per incendi velocità di combustione ULTRAVELOCE

La velocità di incremento dell'HRR presa in considerazione per il caso specifico, vista la natura del materiale, è quella con valore LENTO ( $\alpha = 0,002778$  KJ/s<sup>3</sup>)

**La curva HRR presa in considerazione per l'incendio di progetto è quindi definita con una potenza termica di emissione del minerale fossile  $Q_{max}$  pari a 660 kW/m<sup>2</sup>, con andamento tipo "LENTO" (tasso di crescita " $\alpha$ " pari = 0,02778 KJ/s<sup>3</sup>)**

Pertanto, considerando:

$$Q = \alpha \cdot t^2$$

il valore massimo viene raggiunto in:

$$t = (Q / \alpha)^{1/2} = (660 \text{ KW} / 0,02778 \text{ KJ/s}^3)^{1/2} = 487 \text{ secondi (circa 8 minuti)}$$

Si presuppone poi che l'incendio si inneschi e bruci in maniera incontrollata per almeno i primi **1.050 secondi (circa 17,5 minuti)**. Dopo tale limite si ipotizza l'intervento delle squadre di soccorso e/o dei sistemi di protezione.

Si considera inoltre che i lucernai in policarbonato – in favore della sicurezza – rimangono integri per tutta la durata della simulazione e non costituiscono quindi ulteriori possibili elementi per lo smaltimento dei fumi e dei prodotti di combustione.

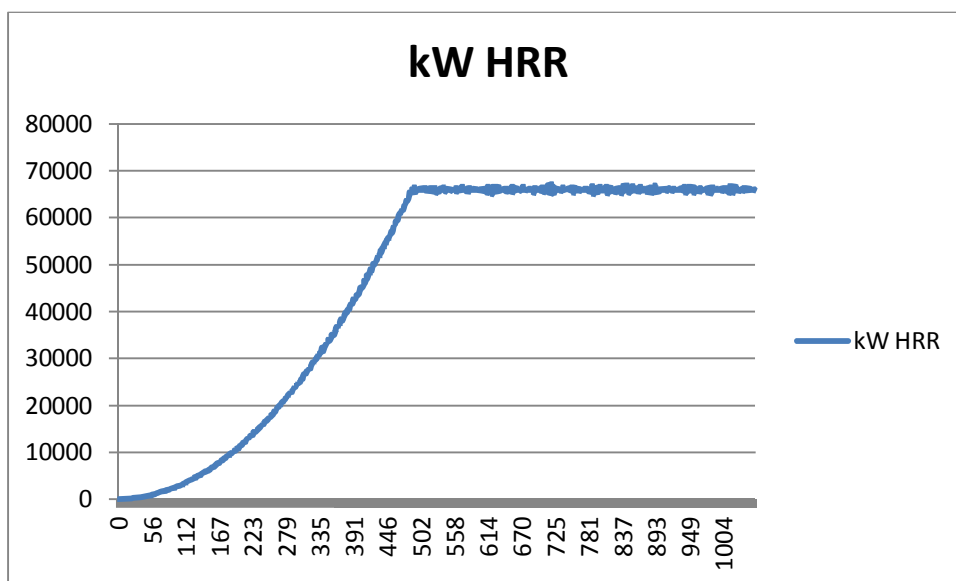


Fig. 6: Andamento HRR

Nella simulazione saranno verificate quindi le condizioni entro i primi 1050 secondi (17,5 minuti).

### 2.4.3 Caratteristiche dell'edificio e degli impianti antincendio

#### a) Caratteristiche dell'edificio

Come già indicato in precedenza, il capannone per la copertura del parco FOSSILI è costituito da una struttura piuttosto semplice. Essa si articola su un'unica campata ad arco, lunga circa 710 m rispetto un asse est-ovest, larga circa 253 m alla base e 264 m nel punto più largo (asse nord-sud), e alta circa 78 m al colmo dell'arcata. La superficie complessiva coperta è pari a circa di 179.630 m<sup>2</sup>.

Le strutture del fabbricato sono così realizzate:

- Il manto di copertura ed il tamponamento è costituito da pannelli in lamiera;
- struttura portante realizzata con elementi reticolari in acciaio;
- presenza di lucernai in policarbonato per l'illuminazione naturale, posti a intervalli regolari lungo tutto lo sviluppo longitudinale della struttura (di seguito un frammento di codice che li definisce)

#### LUCERNAI POLICARBONATO

```
&OBST XB=686,687,-6,-6,14,20 SURF_ID='Lucernaio 1m', SAWTOOTH=.FALSE. / Lucernaio 1m 2
```

```
&OBST XB=686,687,-6,-4,20,20 SURF_ID='Lucernaio 1m', SAWTOOTH=.FALSE. / Lucernaio 1m 3
```

```
&OBST XB=686,687,-4,-4,20,26 SURF_ID='Lucernaio 1m', SAWTOOTH=.FALSE. / Lucernaio 1m 4
```

- presenza di aperture dotate di serranda ricavate alla base delle pareti laterali e camini sulla sommità della struttura dotati di un "labirinto" per fermare e raccogliere le polveri, il tutto in grado di consentire un efficace ricambio d'aria ambiente per convezione naturale.

Le serrande alla base sono costituite da 298 elementi di dimensioni pari a 200 cm x 400 cm (h), mentre i camini (aeratori) posti in sommità sono costituiti da 25 elementi larghi 7,50 m e lunghi 20 m.

Tali aperture sono state considerate come forature delle pareti, come illustrato nel frammento di codice che segue e in figura 7:

#### FORI SU STRUTTURA - FORI SUD

```
&HOLE XB=1.0,13.0,-3.0,-1.0,4.0,8.0/
```

```
&HOLE XB=15.0,27.0,-3.0,-1.0,4.0,8.0/
```

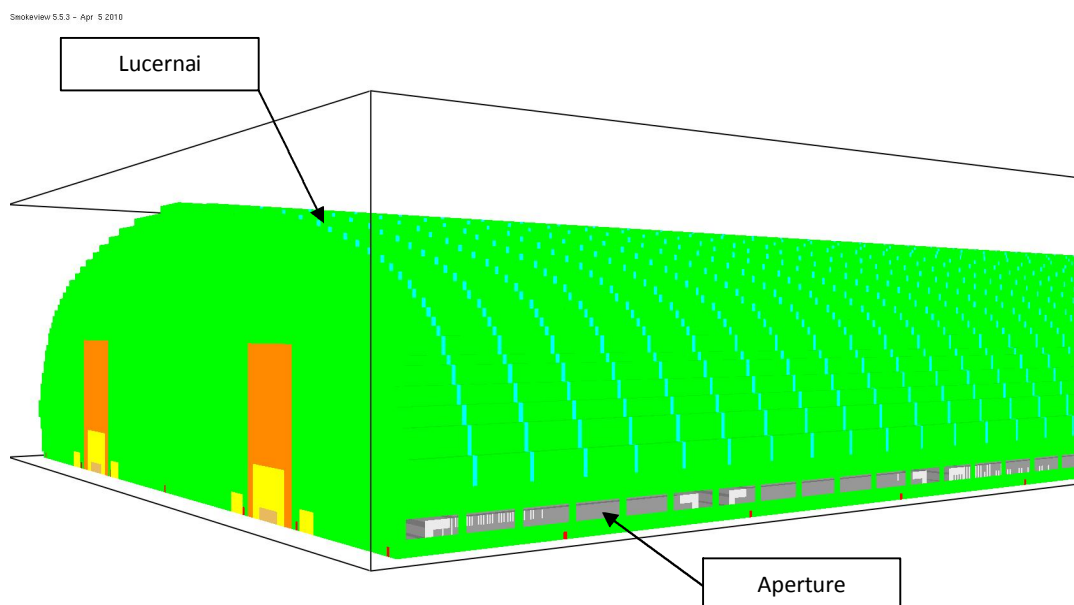


Fig. 7: lucernai e aperture

#### b) Caratteristiche impianti di protezione

Non ricorre in quanto nello sviluppo della simulazione non si prende in considerazione l'intervento di alcun impianto di protezione

#### 2.4.4 Caratteristiche degli occupanti

Sulla base delle indicazioni fornite dalla committenza all'interno del parco fossili si esclude la presenza di:

- portatori di handicap
- dormienti
- persone non a conoscenza delle caratteristiche della struttura
- anziani

e altre tipologie di persone al di fuori di quella di un adulto in buona salute e con normali capacità cognitive e di spostamento. Si segnala la presenza di personale esterno per l'effettuazione di manutenzioni straordinaria formato ed informato sui rischi dell'ambiente in cui opera ed a conoscenza delle procedure di emergenza.

#### 2.4.5 Scenari di incendio di progetto

Confronta punto 2.4.2

### 3 Analisi Quantitativa

#### 3.1 Calcolo della Temperatura

##### 3.1.1 Premessa

La temperatura massima raggiunta all'interno della struttura e il livello di altezza dei fumi sono stati calcolati per lo scenario di incendio di progetto indicato al paragrafo 2.4.5 attraverso un software di campo di simulazione incendi.

##### 3.1.2 Scelta del modello utilizzato

Il software utilizzato per la simulazione è "Fire Dynamics Simulator" versione 5.0 del *National Institute of Standards and Technology* noto come FDS. Trattasi di un modello fluido dinamico computazionale degli effluenti di un incendio. Il modello risolve numericamente le equazioni di Navier Stokes per fluidi aventi basse velocità il cui moto sia guidato da differenze di temperatura; in particolar modo viene simulato il moto del fumo e il trasporto di calore da un incendio. Le equazioni delle derivate parziali di conservazione della massa, del momento e dell'energia sono risolte alle differenze finite. Particelle lagrangiane sono usate dal modello per simulare il movimento del fumo, l'effetto di un sistema di spegnimento automatico e di un combustibile spray. FDS può essere usato per simulare i seguenti fenomeni:

- trasporto a basse velocità di calore e prodotti della combustione da un incendio
- trasferimento di calore per irraggiamento e convezione tra gas e superfici solide
- pirolisi
- propagazione delle fiamme e sviluppo dell'incendio
- attivazioni di sistemi sprinkler, di rilevatori di calore e fumo
- soppressione dell'incendio mediante l'acqua scaricata dagli sprinkler

Nella simulazione in oggetto il modello è stato impiegato esclusivamente per lo studio del movimento dei prodotti della combustione che costituisce, senza dubbio, il principale e meno approssimato obiettivo che si prefigge il software. Gli effluenti sono poi stati considerati in una fase pre-flashover nella quale ancora non

ci sono grosse differenze di temperatura tra le varie parti dell'ambiente; per tale ragioni il software non ha problemi di instabilità. La maggiore potenzialità di FDS si esprime, dunque, proprio nell'analisi di pre-flashover.

### Principali limiti indicati nel manuale

#### *Basse velocità di flusso*

FDS non permette la simulazione di fenomeni di trasporto gas ad alte velocità; pertanto non è possibile simulare fenomeni come esplosioni.

#### *Geometria rettilinea*

L'efficienza del FDS è dovuta alla semplicità della relativa griglia numerica rettilinea e all'uso di un solver veloce e diretto per il campo di pressione. Ciò può essere una limitazione in alcune situazioni dove determinate caratteristiche geometriche non si conformano alla griglia rettangolare, anche se la maggior parte delle componenti della costruzione lo facciano. Ci sono tecniche in FDS per diminuire l'effetto delle ostruzioni "del dente di sega" usate per rappresentare gli oggetti non rectangular; questi, però, non possono fornire buoni risultati se, per esempio, l'intenzione del calcolo è quella di studiare gli effetti di strato di contorno.

#### *Sviluppo e propagazione dell'incendio*

Il modello, progettato inizialmente per analizzare incendi di scala industriale, può essere usato attendibilmente quando la potenza termica rilasciata (HRR) è assegnata e il trasporto di calore e dei prodotti di combustione sono il principale scopo della simulazione. In questi casi il modello predice le velocità dei flussi e le temperature con una accuratezza del 10% - 20 % rispetto a prove sperimentali in funzione delle dimensioni della mesh. Comunque, per gli scenari di incendio dove L'HRR è predetto piuttosto che prescritto, l'incertezza del modello è più alta. Ci sono parecchie ragioni legate a questo fatto:

- proprietà dei materiali e dei combustibili
- il processo fisico di combustione, irraggiamento e trasferimento di calore alla fase solida sono più complicate della loro rappresentazione matematica in FDS
- i risultati dei calcoli sono sensibili sia ai parametri numerici sia a quelli fisici.

#### *Modello di combustione*

Il modello di combustione impiegato è quello a frazione di miscela (mixture fraction), basato sul calcolo di una quantità scalare  $Z$  che in ogni cella del campo stabilisce, ad ogni passo di calcolo, se ha luogo la combustione oppure no: in presenza di combustione l'elemento di volume (corrispondente al centro di cella) viene riscaldato dal rilascio termico conseguente alla reazione e poi colorato in modo da mostrare la presenza della fiamma. Nella sua forma più semplice, il modello assume che la combustione è controllata dalla miscela, e che la reazione di combustibile e ossigeno è infinitamente veloce, senza considerare la temperatura. Per incendi su larga scale e ben ventilati questa è una buona assunzione. Tuttavia, se un fuoco è in carenza di ventilazione o è introdotto un agente estinguente, è permesso che il combustibile e l'ossigeno si mescolino e non brucino, secondo quanto verificato in alcuni test di verifica empirici.

#### *Irraggiamento*

Lo scambio di calore per irraggiamento è incluso nel modello attraverso la soluzione dell'equazione di trasporto di radiazione (RTE) per un gas grigio ed in alcuni casi limitati usando un modello a banda larga. Il RTE è risolto usando una tecnica simile ai metodi a volume finito per il trasporto convettivo, così il nome dato al metodo è il metodo a volume finito (FVM). Ci sono parecchie limitazioni al modello. In primo luogo, il coefficiente di assorbimento per il fumo è una funzione complessa della relative composizione e temperatura. A causa del modello semplificato di combustione, la composizione chimica dei gas di combustione, special-

mente il particolato del fumo, può modificare sia l'assorbimento che l'emissione di radiazione termica. In secondo luogo, il trasporto per irraggiamento è discretizzato con circa 100 angoli solidi, anche se l'utente può scegliere di usare più angoli. Per gli obiettivi lontani da una fonte localizzata di radiazione, come un incendio crescente, la discretizzazione può condurre ad una distribuzione non uniforme dell'energia radiante. Questo errore è chiamato “effetto del raggio” e può essere individuato nella visualizzazione delle temperature di superficie, dove “i punti caldi” mostrano l'effetto del numero limitato degli angoli solidi. Il problema può essere diminuito tramite l'inclusione di più angoli solidi, ma con il prezzo di tempi maggiori di computazione.

### 3.1.3 Principali scelte progettuali della simulazione

Oggetto della simulazione è tutto il complesso PARCO FOSSILI di cui è stato riprodotto un tridimensionale rispondente il più possibile alla realtà. Il dominio computazionale è stato determinato in funzione alla geometria della struttura. Data la forma della struttura si è scelto di utilizzare una mesh unica (MESH 1) come mostra il frammento di codice seguente (cfr. fig. 8 e 9).

```
MESHES
&MESH ID='MESH1', IJK=720,270,90, XB=-10.0,710.0,-8.0,262.0,0,90.0/ MESH TOTALE 17.496.000 CELLE
```

Simulation 5.6 - Oct 29, 2010

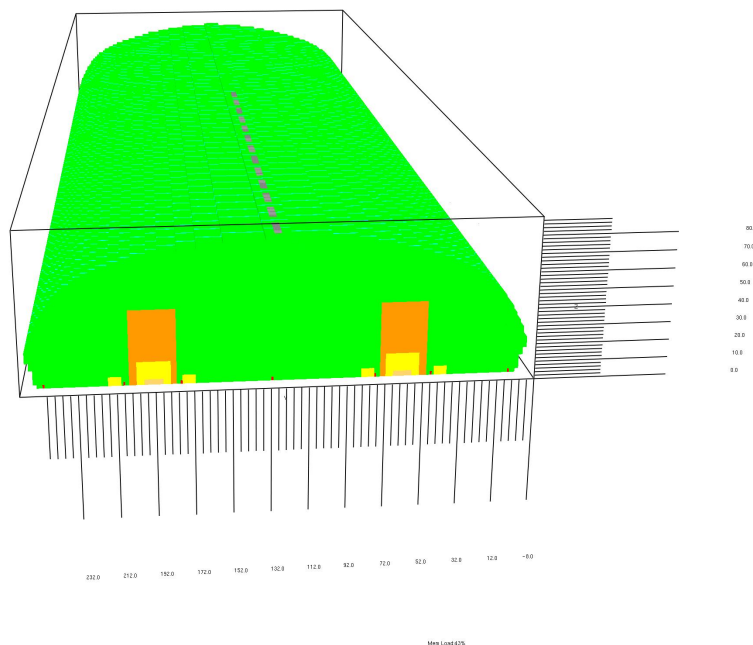


Fig. 8: dominio computazionale e MESH – mesh di simulazione

Il dominio computazionale complessivo di riferimento risulta essere di oltre 17 milioni di celle elementari: ogni cella ha le dimensioni di un cubo con lato 1 m.

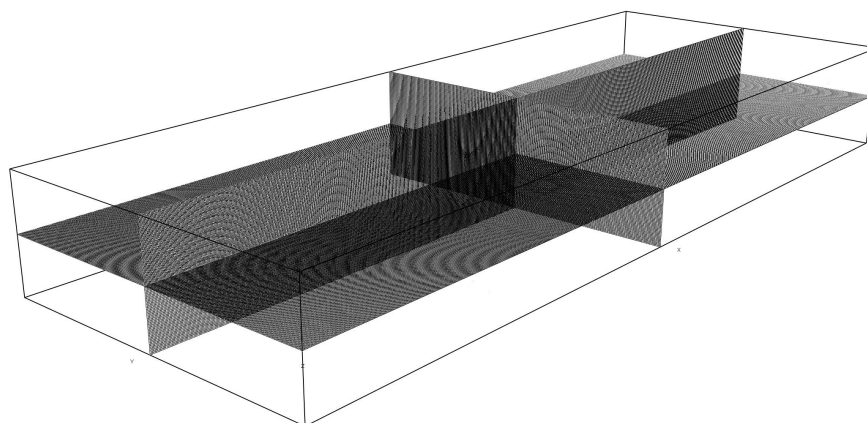


Fig. 9: griglia

Il tempo di simulazione è di 1050 s (17,5 minuti).

I materiali inseriti nella simulazione sono i seguenti:

- Acciaio (steel) per la copertura
- Policarbonato (glass) per le superfici di illuminazione
- Calcestruzzo (concrete) per le pareti di supporto ai cumuli di fossile laterali

Le proprietà termiche riportate sotto sono state prese dalla letteratura tecnica.

```
&MATL ID = 'CONCRETE'  
FYI      = 'Quintiere, Fire Behavior'  
EMISSIVITY = 1.0  
CONDUCTIVITY = 0.76  
SPECIFIC_HEAT = 0.84
```

```
&MATL ID = 'glass'  
FYI      = 'Quintiere, Fire Behavior'  
EMISSIVITY = 1.0  
CONDUCTIVITY = 0.76  
SPECIFIC_HEAT = 0.84
```

```
&MATL ID = 'STEEL'  
FYI      = 'Quintiere, Fire Behavior'  
EMISSIVITY = 1.0  
CONDUCTIVITY = 45.8  
SPECIFIC_HEAT = 0.5
```

Tutte le superfici che costituiscono la struttura (pareti, solaio, ecc.) sono considerate inizialmente “fredde”, cioè a temperatura ambiente.

Per quanto concerne l’incendio, non si è fatto uso del modello di pirolisi del software di simulazione, ma è stata imposta una curva di rilascio termico (HRR). Per le considerazioni tecniche in merito alla scelta della curva si rimanda al paragrafo 2.4.2. Di seguito si inserisce il frammento di codice relativo alla definizione dell’incendio e della reazione di combustione.

```
&SURF ID='Incendio', HRRPUA=660.0, RAMP_Q='INCENDIO',COLOR='RED', PART_ID='smoke' /  
REAZIONE  
REAC ID      = 'COAL'  
FYI          = 'C_H_O'  
SOOT_YIELD   = 0.12  
C            = 1  
H            = 0.371  
O            = 0.55  
HEAT_OF_COMBUSTION = 30000. /
```

In maniera specifica si evidenzia il rateo di produzione dei fumi (SOOT\_YELD), pari a  $0,12 \text{ kg}_{\text{soot}} / \text{kg}_{\text{materiale bruciato}}$ . Tale valore è stato mutuato dalla letteratura tecnica internazionale, considerando che i minerali fosforati sono caratterizzati da una produzione di fumi neri particolarmente accentuata.

A tale proposito si ricorda infatti che il rateo di produzione dei fumi è pari a circa  $0,01 \text{ kg}_{\text{soot}}/\text{kg}_{\text{comb}}$  per materiali prevalentemente cellulosi, mentre raggiunge valori pari a circa  $0,10\text{-}0,12 \text{ kg}_{\text{soot}}/\text{kg}_{\text{comb}}$  per materiali plastici (Fonte: Ministero dell’Interno: DCPST - Osservatorio per l’approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio – D.M. 9 maggio 2007: linee guida per la valutazione dei progetti).

Sono stati quindi posizionati dei dispositivi di rilevazione in modo da creare un reticolo di punti di captazione sufficienti per riuscire a monitorare il volume di interesse.

In modo particolare sono stati inseriti rilevatori di temperatura (THERMOCOUPLE).

Essi sono stati disposti al di sotto delle finestre costituite dai lucernai. Altri rilevatori sono stati inseriti anche in corrispondenza delle travi in acciaio, nelle immediate vicinanze alla struttura (che nella simulazione non viene resa in quanto le dimensioni degli elementi sono al limite del livello di risoluzione della mesh.

Un esempio di frammento di codice utilizzato per rilevatori è il seguente:

```
TERMOCOPPIE SOTTO POLICARBONATO  
&DEVC XYZ=14.5,259.0,19.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCPN.1.1' /  
&DEVC XYZ=14.5,257.0,25.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCPN.1.2' /  
&DEVC XYZ=14.5,255.0,29.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCPN.1.3' /
```

```
TERMOCOPPIE SOTTO TRAVI  
&DEVC XYZ=7.0,251.0,7.9, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCT.1.1' / DEVC 73  
&DEVC XYZ=7.0,247.0,19.9, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCT.1.2' /  
&DEVC XYZ=7.0,243.0,29.9, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCT.1.3' /
```

Essi restituiscono l’andamento della temperatura puntuale in funzione del tempo [°C]

Sono stati inseriti poi elementi che registrano la variazione di altezza dei fumi lungo un asse verticale. Essi sono stati posti in prossimità di tutte le uscite di sicurezza presenti lungo il perimetro della struttura e lungo i corridoi presenti tra i cumuli di carbone (principalmente negli incroci tra i vari corridoi). Di seguito si fornisce un frammento del codice. Nota: per velocizzare i tempi di calcolo gli elementi di rilevazione sono stati “tarati” per registrare la variazione di altezza dei fumi a partire da una quota di 34 m.

```
RILEVATORI ALTEZZA FUMI da quota 34.00 a quota 0.00
&DEVC XB=41.8,41.8,253.50,253.50,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USN_1' / Uscite di sicurezza nord
&DEVC XB=97.8,97.8,253.50,253.50,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USN_2' / Uscite di sicurezza nord
...
&DEVC XB=265.8,265.8,0.50,0.50,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USS_5' / Uscite di sicurezza sud
&DEVC XB=321.8,321.8,0.50,0.50,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USS_6' / Uscite di sicurezza sud
...
&DEVC XB=0.50,0.50,208.5,208.5,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USOv_6' / Uscite di sicurezza ovest
&DEVC XB=0.50,0.50,250.5,250.5,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USOv_7' / Uscite di sicurezza ovest
...
&DEVC XB=700.5,700.5,208.5,208.5,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USEs_6' / Uscite di sicurezza est
&DEVC XB=700.5,700.5,250.5,250.5,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USEs_7' / Uscite di sicurezza est
...
&DEVC XB=48.0,48.0,191.0,191.0,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USC_1' / Uscite corridoi centrali
&DEVC XB=653.0,653.0,191.0,191.0,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USC_3' / Uscite corridoi centrali
```

Essi restituiscono quindi il valore di altezza libera dai fumi espresso in [m].

### 3.1.4 Analisi di sensitività del software

Per il software FDS è stata eseguita una analisi di sensitività dagli stessi autori per tal ragione ne riportiamo una parziale traduzione e rimandiamo per un approfondimento maggiore al capitolo 17 della Guida dell'Utente.

Le dimensioni della mesh costruiscono il parametro numerico più importante nel modello poiché dettano l'esattezza spaziale e temporale delle equazioni differenziali parziali individualizzate.

Il tasso di rilascio calore (HRR) è il parametro fisico più rilevante in quanto è il termine di fonte nell'equazione di energia. Le proprietà dei materiali, come la conducibilità termica, la densità, il calore della vaporizzazione, la capacità termica, ecc., devono essere valutati in termini di influenza sul tasso di rilascio di potenza termica.

Gli studi di convalida hanno indicato che il FDS predice bene il trasporto del calore e del fumo quando il HRR è prescritto. In tali casi i cambiamenti nelle proprietà delle superfici di contorno non hanno un impatto significativo sui risultati. Tuttavia, quando il HRR non è prescritto, ma piuttosto predetto dal modello usando le proprietà termofisiche dei combustibili, l'output del modello è sensibile persino ai cambiamenti minimi in queste proprietà.

Le analisi di sensibilità eseguite sono effettuate tutte nello stesso modo. Per un dato scenario sono effettuate le migliori stime di tutti i parametri fisici e numerici e viene poi lanciata una simulazione di riferimento. Successivamente, uno per uno, i parametri sono variati di una certa percentuale ed i cambiamenti nei risultati sono registrati. Questo rappresenta la forma più semplice di analisi di sensibilità. Le tecniche più specializzate che coinvolgono la variazione simultanea di parecchi parametri sono poco pratiche con un modello di CFD perché il tempo di calcolo è troppo lungo ed il numero dei parametri troppo grande per effettuare il numero necessario dei calcoli atti a generare le statistiche rispettabili.



### *Sensitività della mesh*

La decisione più importante da prendere per un utilizzatore è il formato della griglia numerica. Generalmente, più fine è la griglia numerica, migliore è la soluzione numerica delle equazioni.

A causa della non linearità delle equazioni, la diminuzione nell'errore di discretizzazione non si traduce necessariamente in una diminuzione paragonabile dell'errore del risultato di output di FDS. Per scoprire che effetto una griglia più fine ha sulla soluzione, gli utilizzatori effettuano una forma di studio di sensibilità di griglia in cui la griglia numerica è raffinata sistematicamente fino a che le quantità output non cambino più sensibilmente con ulteriori raffinamenti della griglia. Naturalmente, con ogni dimezzare del formato delle cellule di griglia, il tempo richiesto per la simulazione aumenta da un fattore di  $2^4 = 16$  (un fattore di due per ogni coordinata spaziale, più tempo). Alla fine, un compromesso è raggiunto fra accuratezza del modello e capacità di calcolo.

Come componente di un progetto, per valutare l'uso della versione 1 di FDS per compartimenti ventilati meccanicamente, Friday ha effettuato un'analisi di sensitività al fine di trovare il tempo approssimativo di calcolo basato sui cambiamenti delle dimensioni della mesh. Un incendio di propilene con un tasso di rilascio di potenza termica è stato modellato in FDS. Non c'era ventilazione meccanica ed il fuoco è stato predisposto per svilupparsi in funzione del tempo dall'accensione. Il compartimento era 3 m per 3 m. e alto 6.1 m. Le temperature sono state misurate 12 cm sotto il soffitto. Quattro formati di mesh sono stati scelti per l'analisi: 30 cm, 15 cm, 10 cm, 7.5 cm. Le stime della temperatura non hanno evidenziato cambiamenti sostanziali con differenti dimensioni di griglia.

Xin ha usato FDS per modellare un bruciatore quadrato di metano (1 m per 1 m) all'aperto. Le correlazioni ingegneristiche per i profili di temperatura e di velocità sulla verticale centrale del plume, sono state paragonate alle previsioni di modello per valutare l'influenza della griglia numerica delle dimensioni del dominio di calcolo. I risultati hanno indicato che FDS è sensibile alle variazioni delle dimensioni della mesh, particolarmente nella regione vicino alla superficie del combustibile ed agli effetti di dimensioni del dominio quando la larghezza di dominio è meno di due volte la larghezza del plume. FDS usa una pressione costante in ambienti aperti. Questo presupposto influenza il plume se il contorno del dominio di calcolo è troppo vicino.

Ierardi e Barnett hanno usato la versione 3 di FDS per modellare un bruciatore quadrato di metano da 0.3 m con i valori di tasso di rilascio di potenza termica variabile nel range di 14.4 KW- 57.5 KW. Il dominio computazionale usato era di 0.6 m. da 0.6 m. con i mesh uniformi di 15, 10, 7.5, 5, 3, 1.5 cm per tutti e tre le coordinate. Per il range di rilascio di HRR, è stato trovata una griglia di 1.5 cm per fornire il migliore accordo con le correlazioni di McCaffrey per la temperatura e la velocità sulla verticale centrale del plume.

Sono stati inoltre modellati con FDS due scenari simili che costituiscono la base per correlazione del ceiling jet di Alpert. Il primo scenario era una pozza 1 m. per 1 m., da 670 chilowatt di etanolo sotto un soffitto non confinato alto 7 m. Le dimensioni planari del dominio di calcolo erano di 14 m per 14 m. Nella modellazione sono stati utilizzati quattro mesh uniformi da 50, 33.3, 25 e 20 cm. L'accordo migliore per la temperatura massima del getto a soffitto era con la griglia da 33.3 cm. Il migliore accordo per velocità massima del getto a soffitto era con la mesh da 50 cm. Il scenario era una pozza da 0.6 m per 0.6 m. da 1000 Kw di etanolo sotto un soffitto non confinato alto 7.2 m. Le dimensioni planari del dominio di calcolo erano di 14.4 m. per 14.4. Nella modellazione sono stati utilizzati quattro mesh uniformi da 60, di 30 e 20 cm. I risultati indicano che la mesh di 60 cm da il migliore accordo con le correlazioni sia per la temperatura massima che per la velocità del getto del soffitto. Peterson inoltre ha ultimato i lavori che valutano il formato ottimale di griglia per la versione 2 di FDS. Le previsioni del modello FDS dei formati varianti di griglia sono state confrontate con due esperimenti separati di incendio: Tests dell'università dell'isola di Canterbury McLeans e le prove della Marina degli Stati Uniti nelle Hawaii. Il primo insieme delle prove ha utilizzato una stanza con le dimensioni approssimative di 2.4 m. per 3.6 m. per 2.4 m e incendi da 55 KW e di 110KW. Le prove della

Marina sono state effettuate in un capannone che misurava 98 m per 74 m per 15 m di altezza con incendi di 5.5 Mw a 6.6 Mw. I risultati di questo studio indicano che le simulazioni di FDS con griglie di 0.15 m hanno avuto previsioni di temperatura esatte quanto i modelli con le griglie più piccole da 0.10 m. Ciascuno di questi formati di griglia hanno fornito i risultati con variazioni del 15% dalle misure di temperatura dell'università di Canterbury. La griglia da 0.30 m ha fornito i risultati meno esatti. Dal confronto con prove del capannone della Marina, i formati di griglia che variano da 0.60 m. a 1.80 m hanno dato i risultati di esattezza paragonabile.

#### *Sensitività dei parametri delle simulazioni Large Eddy*

FDS usa la forma di Smagorinsky della Large Eddy Simulation (LES). Ciò significa che invece usare la viscosità dei fluidi reali, il modello usa una viscosità della forma:

$$\mu_{LES} = \rho(C_s \Delta)^2 |S|^{1/2}$$

dove il  $C_s$  è una costante empirica,  $\Delta$  è una lunghezza dell'ordine del formato di una cellula della griglia ed il termine di deformazione  $|S|$  è collegato con la funzione di dissipazione. Sono collegate con "la viscosità turbolenta,, le espressioni per la diffusività del materiale e la conducibilità termica:

$$k_{LES} = (\mu_{LES} \cdot c_p) / Pr$$

$$(\rho D)_{LES} = \mu_{LES} / Sc$$

Il di numero di Prandtl e di numero di Schmidt ( $Sc$ ) sono considerati come valori "turbolenti,,. Quindi, il  $C_s$ ,  $Pr$  e lo  $Sc$  sono un insieme di costanti empiriche. La maggior parte dei utenti del FDS usano i valori di default (0.2, 0.5, 0.5), ma alcuni hanno esplorato il loro effetto sulla soluzione delle equazioni.

In uno sforzo per convalidare il FDS con alcuni dati semplici di temperatura di ambienti, Zhang ed altri hanno provato le combinazioni differenti dei parametri di Smagorinsky ed hanno suggerito i valori di default correnti. Dei tre parametri, la costante  $C_s$  di Smagorinsky è il più sensibile. Smagorinsky all'origine ha proposto un valore di 0.23, ma dei ricercatori durante le tre decadi scorse hanno usato i valori che variano da 0.1 a 0.23. Ci sono inoltre perfezionamenti del modello originale di Smagorinsky che non richiedono all'utente di prescrivere le costanti, ma piuttosto le generano automaticamente come componente dello schema numerico

#### *Sensitività dei parametri di irraggiamento*

Lo scambio di calore per irraggiamento è incluso in FDS attraverso la soluzione dell'equazione di trasporto di radiazione per un gas grigio ed in alcuni casi limitati usando un modello a banda larga. L'equazione è risolta usando la tecnica simile al tecnica del volume finito per il trasporto convettivo. Ci sono parecchie limitazioni del modello. Hostikka ed altri hanno esaminato la sensitività del solver di radiazione ai cambiamenti nella produzione del fumo, nel numero delle fasce spettrali, nel numero degli angoli di controllo e la temperatura della fiamma. Alcuni dei risultati trovati sono:

- cambiando il rateo di produzione di fumi dal 1% al 2% si ha un incremento del flusso irraggiato da un bruciatore di metano di circa 15%;
- abbassando il rateo di produzione di fumi a zero, flusso irraggiato decresce del 20%;
- cambiando il numero delle bande spettrali da 6 a 10 non si ha un forte effetto sui risultati;
- Gli errori di 100% nel flusso di calore sono stati causati da errori del 20% nella temperatura assoluta.

La sensitività della temperatura di fiamma e della composizione dei fumi sono conformi con la teoria di combustione, che afferma che il termine sorgente dell'equazione di trasporto per irraggiamento è una funzione del coefficiente di assorbimento moltiplicato per la temperatura assoluta elevata alla quarta potenza.

Il numero degli angoli di controllo e bande spettrali sono parametri numerici controllati dall'utente per i quali la sensibilità deve essere controllata per ogni scenario. I valori di default in FDS sono adatti per la maggior parte degli scenari di incendio, ma possono avere bisogno di essere raffinato per le simulazioni più dettagliate

#### *Sensibilità dei parametri termo-fisici dei combustibili solidi*

Una vasta quantità di lavoro di convalida e di verifica con la versione 4 di FDS è stata realizzata da Hieta-niemi, da Hostikka e da Vaari del VTT, Finlandese. Gli studi comprendono: esperimenti con cono calorimetrico (ISO 5660-1) e prove di incendio in scale reale quale la prova dell'angolo della stanza (ISO 9705). I confronti inoltre sono fatti fra i risultati di FDS ed i dati ottenuti con singole prove di incendio così come i dati ottenuti in due configurazioni sperimentali ad-hoc: uno è simile alla prova di incendio nell'angolo della stanza ma ha soltanto rivestimenti parziali e l'altro è uno spazio per studiare i fuochi in cavità della costruzione. Tutti questi casi di studio coinvolgono i materiali reali di cui le proprietà devono essere prescritte in modo da conformarsi al presupposto in FDS che i solidi sono di composizione uniforme costituiti da un materiale che è freddo o completamente isolante. La sensibilità di varie proprietà fisiche e le proprietà di contorno sono stati provati. Alcuni dei risultati trovati sono:

- le velocità di combustione misurate di vari materiali sono cadute spesso fra due previsioni di FDS per le quali le superfici del solido erano state considerate fredde o isolate posteriormente, FDS difetta per un modello solido a più strati;
- il tempo di accensione di cuscini è sensibile alle proprietà termiche della copertura del tessuto, ma la velocità di combustione è sensibile alle proprietà della gomma piuma interna;
- il tenore d'acqua nei combustibili di legno è molto importante e difficile da misurare.
- la propagazione della fiamma a oggetti complicati, come i cavi in traccia, può essere modellata se l'area superficiale di un oggetto semplificato è paragonabile a quella dell'oggetto reale. Ciò suggerisce che la sensibilità non è solo in merito alle proprietà fisiche, ma anche alle geometriche. È difficile da misurare la sensibilità geometrica.

Le curve di crescita dell'incendio possono essere lineari o esponenziali e piccoli cambi nelle proprietà del combustibile possono portare a cambiamenti di un ordine di grandezza nel rateo di rilascio di potenza termica per incendi non confinati. Recentemente, Lautenberger, Rein e Fernandez-Pello hanno messo a punto un metodo per automatizzare il processo di stima delle proprietà dei materiali input di FDS.. Tali tecniche sono necessarie perché la maggior parte delle apparecchiature bench-scale non forniscono un insieme completo delle proprietà termiche.

### **3.1.5 Verifica del software**

Per il software FDS è stata eseguita una verifica di affidabilità del software da parte degli stessi autori per tal ragione ne riportiamo una parziale traduzione e rimandiamo per un approfondimento maggiore al capitolo 15 della Guida dell'Utente.

La norma ASTM E 1355 descrive i metodi per la valutazione matematica e numerica dell'affidabilità dei modelli di incendio deterministici. Questo processo spesso denominato "modello di verifica" garantisce l'esattezza delle soluzioni numeriche. I metodi includono il confronto con soluzioni analitiche, il codice di controllo e prove numeriche.

#### *Confronto con soluzioni analitiche*

La maggior parte dei complessi processi di combustione, tra cui gli incendi, sono dei processi turbolenti e dipendono dal tempo. Non esistono soluzioni matematiche in forma chiusa per processi completamente turbolenti o dipendenti dal tempo delle equazioni di NAVIER-STOKES.

I codici CFD forniscono una soluzione approssimata per le equazioni differenziali non lineari con delle equazioni algebriche che possono essere risolte con dei computer potenti. Siccome non ci sono soluzioni analitiche generali per flussi completamente turbolenti, alcuni sotto modelli indirizzano i fenomeni verso quelli di cui si ha una soluzione analitica come ad esempio la trasmissione di calore monodimensionale attraverso un solido.

Queste soluzioni analitiche possono essere utilizzate per testare i sotto modelli con codici di calcolo complessi come FDS. Gli sviluppatori di FDS fanno uso abitualmente di tali pratiche per verificare la correttezza della codifica del modello; tali verifiche sono relativamente semplici e abituali ma i risultati non sono sempre pubblicati nella documentazione.

Esempi di test analitici :

- L'irraggiamento è stato verificato con scenari dove semplici oggetti (cubi, lastre piane) sono stati posizionati in semplici compartimenti. Non sono presenti i moti convettivi e agli oggetti sono assegnati la temperatura superficiale e il potere emissivo (in modo da renderlo un corpo nero). Il flusso di calore che circonda le pareti fredde del muro è registrato e comparato con le soluzioni analitiche. Questi studi aiutano a determinare il numero di angoli solidi da impostare come predefiniti.
- Gli oggetti solidi sono riscaldati con un flusso di calore fissato; la temperatura superficiale e interna in funzione del tempo sono confrontate con le soluzioni analitiche dell'equazione della trasmissione del calore per conduzione nel caso monodimensionale. Questi studi sono utili per determinare il numero di nodi da usare nel modello per la trasmissione del calore nella fase solida. Studi simili servono per controllare modelli di pirolisi per solidi termoplastici e carbonizzati. All'inizio del suo sviluppo, la soluzione numerica del flusso idrodinamico che ha sviluppato il nucleo di FDS, è stata controllata con fenomeni di flusso di fluido semplificati. Questi studi sono stati condotti presso la NBS (National Bureau of Standard). L'inizio del lavoro è stato quello di testare la stabilità e la coerenza del risolutore idrodinamico, specialmente le coppie velocità-pressione che sono di vitale importanza nel basso numero di applicazioni Mach. Numerosi algoritmi numerici sviluppati fino ad ora erano usati per applicazioni ad alte velocità di flusso come nel settore aerospaziale. Molte delle tecniche adottate da FDS sono state originariamente sviluppate per modelli meteorologici e come tali dovevano essere testati per valutare se sarebbe stato opportuno descrivere dei flussi a basse velocità all'interno di spazi chiusi.

Di fondamentale importanza è la decisione di Rhem e Baum prese all'inizio dello sviluppo di FDS cioè quella di risolvere in maniera diretta il problema della pressione piuttosto che in maniera iterativa. Nella formulazione del numero di Mach nelle equazioni di Navier-Stokes compare una equazione differenziale parziale chiamata equazione di Poisson. La maggior parte dei metodi CFD usano tecniche iterative per risolvere le equazioni di conservazione al fine di evitare di risolvere direttamente l'equazione di Poisson. La ragione di ciò sta nel fatto che l'equazione è espressa in funzione del tempo e si deve risolvere su una linea rettilinea. Siccome FDS è sviluppato specificamente per griglie rettilinee la risoluzione è abbastanza veloce e si può sviluppare la risoluzione diretta dell'equazione di Poisson ottenendo la pressione con un solo passaggio con l'ausilio di una macchina di precisione. FDS impiega una doppia precisione (8 byte) aritmetica il che significa che la differenza tra la soluzione esatta e quella discretizzata dal programma è dell'ordine di  $10^{-12}$ . L'intero sistema di equazioni è legato alla coppia velocità pressione e alcune simulazioni impiegano anche centinaia di migliaia di passaggi e ogni passaggio mi dà due soluzioni dell'equazione di Poisson con la precisione del secondo ordine. Senza l'uso del solutore diretto di Poisson si potrebbero produrre delle simulazioni con degli errori e quindi non accettabili, infatti il tentativo con la precisione della singola coppia (4 byte) ha portato a degli errori intollerabili.

### Codice di controllo

L'esame della struttura del programma può essere utilizzato per individuare eventuali errori nelle soluzioni numeriche delle equazioni che regolano i fenomeni. La codifica può essere verificata da un terzo manualmente o automaticamente con dei programmi che individuano irregolarità e incongruenze. Al NIST e altrove FDS è stato compilato ed eseguito su PC fabbricati da numerose case costruttrici tra cui: IBM, HP, Sun Microsystems, Digital Equipment Corporation, Apple, Silicon Graphics, Dell, Compaq.

I sistemi operativi su queste piattaforme includono: UNIX, LINUX, MICROSOFT WINDOWS, MAC OSX. I compilatori utilizzati comprendono: Lahey Fortran, Digital Visual Fortran, Intel Fortran, IBM XL Fortran, HPUX Fortran, Forte Fortran for SunOS, the Portland Group Fortran e molti altri. Ogni combinazione di Hardware, sistema operativo e compilatore comporta una serie di operazioni di compilazione, Run-time e una rigorosa valutazione del codice sorgente per verificare la sua conformità con il FORTRAN 90 ISO/ANSI Standard. Attraverso questo processo non aggiornato e potenzialmente dannoso i codici sono aggiornati o eliminati; spesso il codice sorgente può essere ottimizzato sulle diverse macchine. Tuttavia siccome il codice sorgente può essere compilato facilmente ed eseguito su una vasta gamma di piattaforme non garantisce la correttezza. È solo l'inizio del processo perché almeno esso esclude la possibilità che risultati errati o spuri siano dovuti alla piattaforma in cui il codice viene eseguito. Al di là dei problemi Hardware, ci sono diverse tecniche utili per il controllo del codice sorgente di FDS che sono state sviluppate nel corso degli anni. Uno dei modi migliori è quello di sfruttare la simmetria. FDS è compilato con migliaia di linee di codice in cui le derivate parziali dell'equazione di conservazione sono approssimate con il metodo delle differenze finite. È molto facile in questo modo commettere errori. Si consideri ad esempio il metodo delle differenze finite nei termini della diffusione termica della  $ijk$ -esima cella della griglia tridimensionale.

$$\begin{aligned}(\nabla \cdot k \nabla T)_{ijk} \approx & \frac{1}{\delta x} \left[ k_{i+\frac{1}{2},jk} \frac{T_{i+1,jk} - T_{ijk}}{\delta x} - k_{i-\frac{1}{2},jk} \frac{T_{ijk} - T_{i-1,jk}}{\delta x} \right] + \\ & \frac{1}{\delta y} \left[ k_{i,j+\frac{1}{2},k} \frac{T_{i,j+1,k} - T_{ijk}}{\delta y} - k_{i,j-\frac{1}{2},k} \frac{T_{ijk} - T_{i,j-1,k}}{\delta y} \right] + \\ & \frac{1}{\delta z} \left[ k_{ij,k+\frac{1}{2}} \frac{T_{ij,k+1} - T_{ijk}}{\delta z} - k_{ij,k-\frac{1}{2}} \frac{T_{ijk} - T_{ij,k-1}}{\delta z} \right]\end{aligned}$$

DTDX = (TMP(I+1,J,K)-TMP(I,J,K))\*RDXN(I)

KDTEX(I,J,K) = .5\*(KP(I+1,J,K)+KP(I,J,K))\*DTDX

DTDY = (TMP(I,J+1,K)-TMP(I,J,K))\*RDYN(J)

KDTEY(I,J,K) = .5\*(KP(I,J+1,K)+KP(I,J,K))\*DTDY

DTDZ = (TMP(I,J,K+1)-TMP(I,J,K))\*RDZN(K)

KDTEZ(I,J,K) = .5\*(KP(I,J,K+1)+KP(I,J,K))\*DTDZ

DELKDEL = (KDTDX(I,J,K)-KDTDX(I-1,J,K))\*RDX(I) + . (KDTDY(I,J,K)-KDTDY(I,J-1,K))\*RDY(J)

+ . (KDTDZ(I,J,K)-KDTDZ(I,J,K-1))\*RDZ(K)

Questo è uno dei costrutti più semplici perché il modello che emerge all'interno delle linee di codice è abbastanza facile da controllare. Tuttavia un errore di digitazione di una "i" o una "j" o di un "+" o un "-" o di altri svariati errori può causare il fallimento del codice. Il modo più semplice per eliminare molti degli errori è quello di lanciare semplici scenari con simmetria iniziale e condizioni al contorno. Ad esempio se si posizionasse un cubetto caldo al centro esatto di un grande compartimento freddo in assenza di gravità, si può notare come il calore si diffonde dal cubo caldo nei gas freddi. Ogni semplice errore di codifica dell'equazione dell'energia sarà evidenziata quasi immediatamente. Con la gravità e in assenza di errori il plume (pennacchio) si svilupperà perfettamente simmetrico dal cubo caldo. Analoghe verifiche alle differenze finite possono essere fatte per tutte e tre le dimensioni. Questi tipi di controlli che la versione finale di FDS esegue, generano una piccola quantità di rumore casuale nel campo del flusso iniziale in modo da

eliminare qualsiasi falsa simmetria che potrebbe sorgere nella simulazione numerica. Il processo di aggiunta di nuove operazioni di FDS è il seguente: in genere l'equazione è scritta da una sola persona non necessariamente da una dello staff del NIST, che prende l'ultima versione del codice sorgente, aggiunge l'operazione e scrive una descrizione teorica e numerica per la guida tecnica di riferimento per l'utente ampliata da una descrizione dei parametri di input per la guida utente di FDS. La nuova versione di FDS è quindi analizzata con un certo numero di scenari di riferimento dal NIST che verifica la nuova gamma di parametri. L'accettazione provvisoria della nuova operazione si basa su diversi fattori:

- Produce risultati più accurati rispetto a dati sperimentali
- La descrizione teorica è completa
- Gli eventuali parametri sono empirici e deducibili dalla letteratura scientifica.

Se la nuova operazione è accettata, viene aggregata alla versione di prova del software, valutata da operatori esterni o utenti esterni e ricercatori del NIST. Supponendo che non ci siano problemi durante il periodo di prova la nuova funzione va a far parte della versione di FDS. Nonostante tutti i controlli effettuati dal NIST può succedere che rimangano degli errori. Un rimedio è quello di far utilizzare il codice sorgente in maniera freeware. Anche si tratta di dichiarazioni di Fortran dell'ordine di 10000 stringhe, alcuni ricercatori esterni al NIST sono stati in grado di lavorare con esso aggiungere accessori necessari per applicazioni molto specifiche o per scopi di ricerca e di riferire agli sviluppatori i buchi del programma. Il codice sorgente è organizzato in 14 file separate, ognuna contenente sub-operazioni relative ad una particolare caratteristica del modello, come la massa le equazioni di conservazione dell'energia, attivazione sprinkler e spray e l'equazione di pressione ecc.

Le operazioni più lunghe sono destinate a input, output e inizializzazione. La maggior parte di coloro che lavorano con FDS non si cura di queste lunghe operazioni piuttosto si concentrano su algoritmi di differenze finite contenuti in alcuni file. Gli errori più gravi si trovano in questi files perché contengono il nucleo dell'algoritmo. I ricercatori esterni forniscono un feedback sull'organizzazione del codice e della sua documentazione che è contenuta all'interno del codice stesso. Inoltre essi devono compilare il codice sul proprio PC con l'aggiunta delle caratteristiche di portabilità. Tuttavia la maggior parte delle segnalazioni degli errori dei processi sono via e-mail e privi di documentazione. La maggior parte di rapporti di errore coinvolge dei processi che non sono frequentemente utilizzati dagli sviluppatori di FDS. Ad esempio l'apertura di porte o compartimenti, rottura di finestre in particolare su attivazione di un rilevatore, sono comunemente utilizzati per la sicurezza delle persone nell'ingegneria antincendio ma meno dal NIST. Di conseguenza numerose relazioni sono state fatte nel corso degli anni, di sequenze complicate di eventi descritti dall'utente e non sono valutate dal programma. Gli errori sono facili da risolvere, ma il gran numero di scenari possibili rende difficile controllarli tutti. Altri problemi segnati dagli utenti riguardano scenari che utilizzano parametri per i quali il modello non è stato originariamente concepito. Muri di schiuma, incendi in una cella frigorifera, fughe di gas, fuoriuscite di carburante sono solo alcuni dei fenomeni oggetto di modellazione, ma gestiti con difficoltà perché i parametri del modello non sono mai stati verificati o non sono ammessi (es.: temperature inferiori a quella ambiente). Questa continua interazione con gli utenti contribuisce a migliorare il prodotto.

**TEST NUMERICI.** Le tecniche numeriche utilizzate per risolvere le equazioni che disciplinano l'interno di un modello possono essere fonte di un errore nei risultati. Il modello idrodinamico FDS ha una precisione del secondo ordine, nello spazio e nel tempo. Ciò significa che l'errore commesso approssimando con il metodo delle differenze finite le derivate parziali spaziali, è dell'ordine del quadrato della dimensione della cella della griglia, anche l'errore, per quanto riguarda l'approssimazione delle derivate temporali, è dell'ordine del quadrato dell'intervallo di tempo. Siccome la griglia è esatta l'errore dovuto alla discretizzazione decresce e si ha una più fedele visualizzazione del flusso. Più la griglia è precisa e fitta più il modello sarà attendibile. Una comune tecnica di analisi dell'equazione di flusso è perfezionare sistematicamente la griglia numerica

finché la soluzione computata non cambia al punto che il calcolo è denominato DIRECT NUMERICAL SOLUTION che disciplina l'equazione. Per la maggior parte di scenari di incendio la DNS non è possibile su computer standard. Tuttavia FDS può essere lanciato in modalità DNS dove l'equazione di NAVIER-STOKES sono risolte senza l'uso di modelli in scala turbolenti di alcun tipo. Poiché il modello numerico di base è lo stesso per il LES e il DNS, i calcoli DNS sono un modo molto efficace per testare le soluzioni; in particolare nei casi in cui la soluzione è allo stato stazionario. Durante il suo sviluppo di FDS è stato utilizzato in modalità DNS per applicazioni speciali: ad esempio, FDS è stato utilizzato con una griglia di risoluzione di 1 mm per studiare la diffusione delle fiamme in un ambiente a bassissima gravità così come gli effetti "g-jitter" a bordo dei veicoli spaziali. Le simulazioni sono state configurate con esperimenti effettuati a bordo di Shuttle Americani. Il moto delle fiamme è in regime laminare e ha una struttura relativamente semplice. Studi simili sono stati effettuati in DNS, confrontando le simulazioni di un semplice bruciatore a fiamma in laboratorio. In questa prova è stato ottenuto quasi un perfetto accordo con l'esperimento, affinando sistematicamente la griglia. Questo non sarebbe possibile se ci fosse un difetto di base sul solutore idrodinamico.

### 3.1.6 Analisi dei risultati

I risultati vengono riportati per quanto concerne la situazione all'interno del capannone.

#### 3.1.6.1 Temperature registrate

Nei grafici delle pagine che seguono vengono riportati i valori delle temperature espresse in °C in funzione del tempo espresso in secondi delle varie termocoppie poste in sommità alla copertura. In particolare i dati riportati sono quelli relativi alle termocoppie che hanno raggiunto la temperatura maggiore tra tutte quelle presenti all'interno del dominio di simulazione, poste a quota variabile tra 45,8 e 49,8 m (circa 0,20 m al di sotto dell'altezza delle coperture), nella sezione laterale posta al di sopra dell'incendio (cfr rispettivi frammenti di codice):

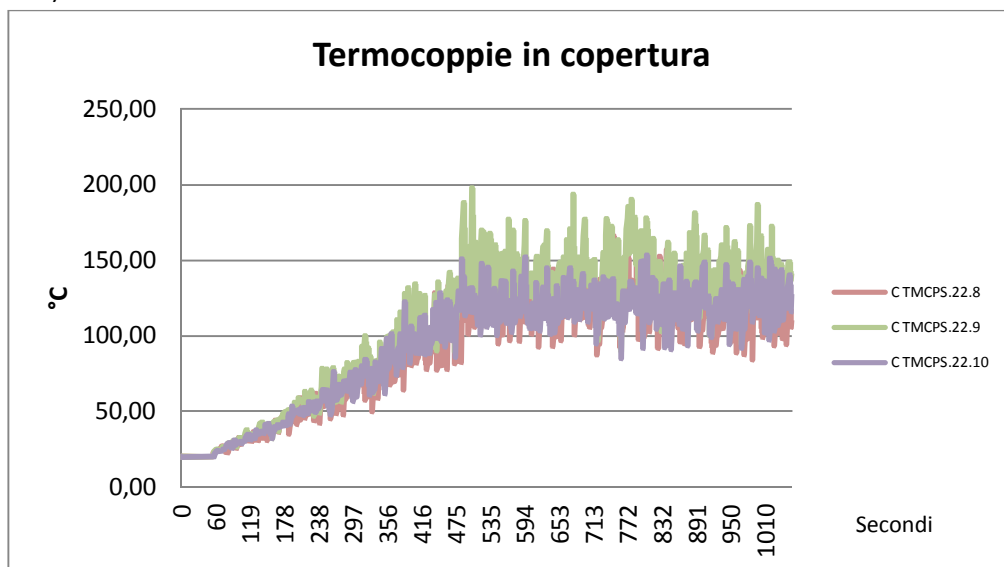


Fig. 10: temperature termocoppie più sollecitate

```
&DEVC XYZ=308.5,9.0,45.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCP5.22.8' /
&DEVC XYZ=308.5,11.0,47.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCP5.22.9' /
&DEVC XYZ=308.5,13.0,49.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCP5.22.10' /
```

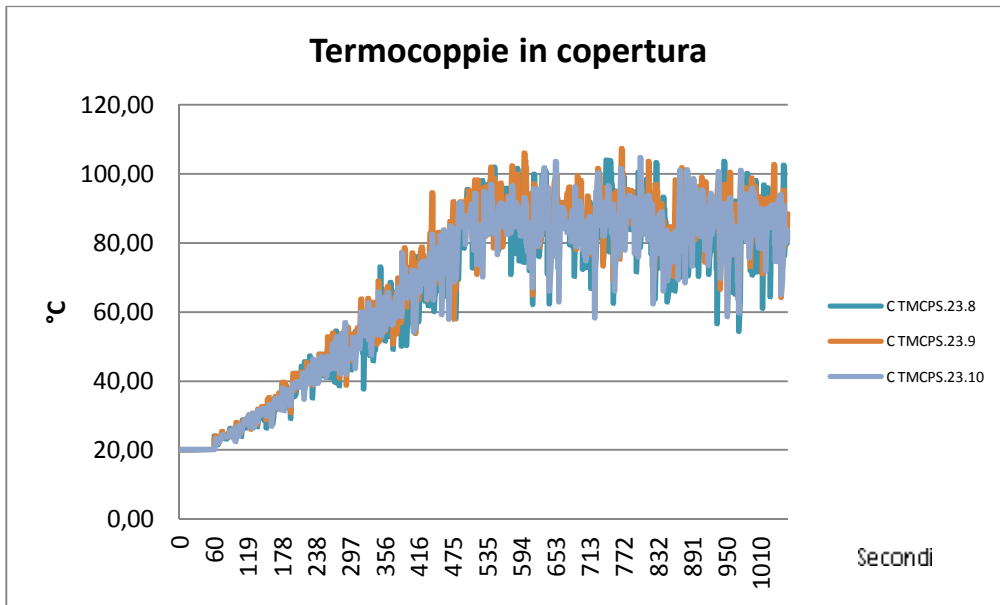


Fig. 11: temperature termocoppie serie adiacenti

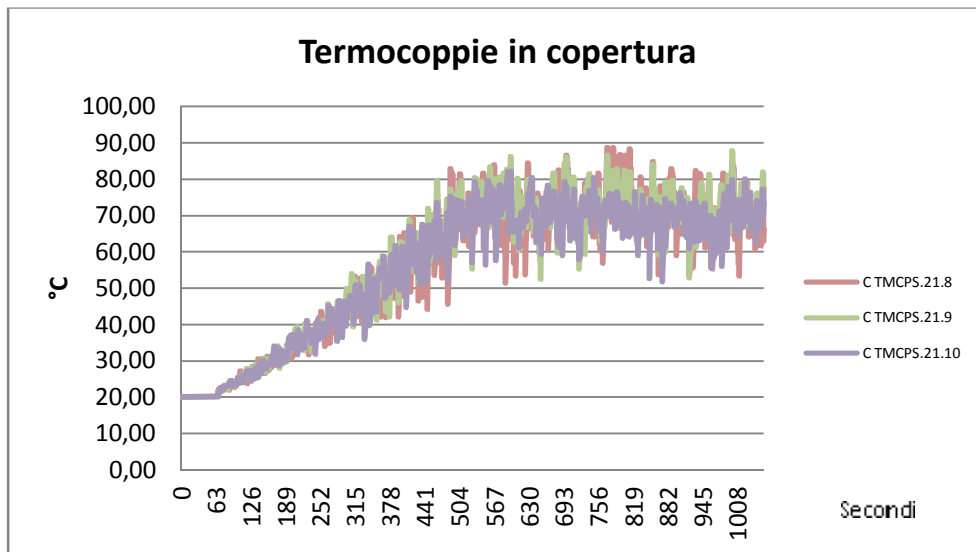


Fig. 12: temperature termocoppie serie adiacenti

```

&DEVC XYZ=294.5,9.0,45.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCPs.21.8' /
&DEVC XYZ=294.5,11.0,47.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCPs.21.9' /
&DEVC XYZ=294.5,13.0,49.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCPs.21.10' /

&DEVC XYZ=322.5,9.0,45.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCPs.23.8' /
&DEVC XYZ=322.5,11.0,47.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCPs.23.9' /
&DEVC XYZ=322.5,13.0,49.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCPs.23.10' /
  
```

Tali valori sono stati calcolati con una temperatura ambientale base prevista dallo scenario di 20 °C.

Nell'ipotesi di condizioni ambientali diverse, per esempio durante il periodo estivo, con:

- temperature interne nell'ordine dei 35-40 °C a livello del piano di campagna,
- presenza di un gradiente termico tale per cui in sommità si raggiungono temperature di circa 50-55 °C,



e considerando in favore della sicurezza la somma diretta della differenza di temperatura tra le condizioni dello scenario simulato e quelle “estive”, la temperatura raggiunge dei valori di picco pari a circa 200 °C.

Nei grafici delle pagine che seguono vengono invece riportati i valori delle temperature espresse in °C in funzione del tempo espresso in secondi delle varie termocoppie poste prossimità degli elementi portanti, e più precisamente nella parte più bassa della trave reticolare. In questo caso i dati riportati sono quelli relativi alla termocoppia che ha raggiunto la temperatura maggiore (cfr. frammento di codice).

```
&DEVC XYZ=315.0,19.0,51.9, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TMCT.23.18' /
```

La differenza di temperatura rispetto alle termocoppie in copertura deriva principalmente dalla posizione geometrica della termocoppia: infatti non essendo a ridosso della copertura dove avviene la stratificazione sia dei fumi, sia delle temperature, essa rileva temperature più basse.

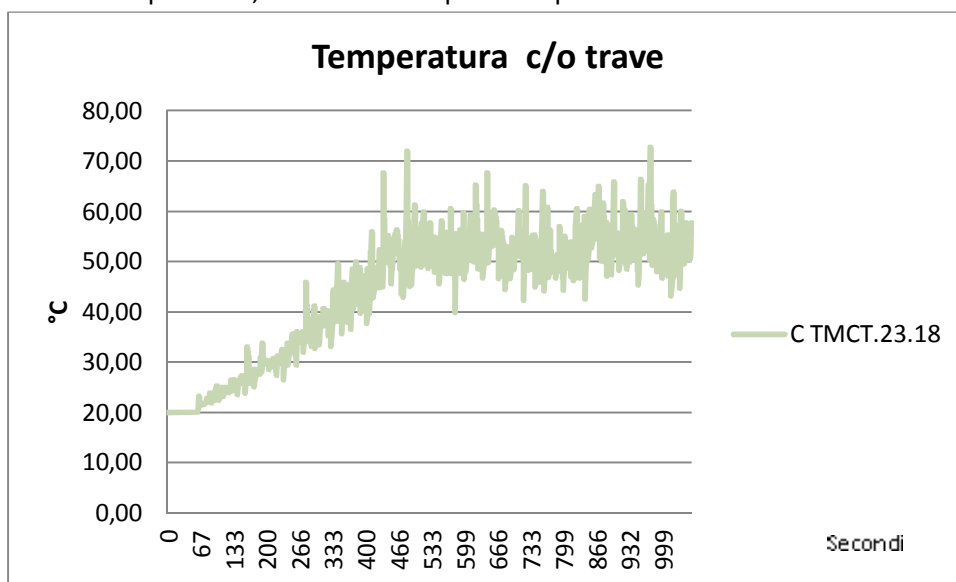


Fig. 13: temperature termocoppie sotto trave c/o area incendio

Per quanto riguarda i valori di altezza di fumo rilevati dagli elementi già definiti in precedenza i valori sia per l’uscita di sicurezza più prossima all’incendio (la n. 5 e la n. 6 – vedi frammento di codice), sia lungo i corridoi interni non hanno registrato presenza di fumo al di sotto dei 34 m.

```
&DEVC XB=265.8,265.8,0.50,0.50,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USS_5' / Uscite di sicurezza sud
&DEVC XB=321.8,321.8,0.50,0.50,0.0,34.0, QUANTITY='LAYER HEIGHT', ID='USS_6' / Uscite di sicurezza sud
```

Per comodità di consultazione riportiamo le coordinate  $x_0-x_1$ ,  $y_0-y_1$ ,  $z_0-z_1$  dell’incendio :

```
INCENDIO
&OBST XB=307.0,317.0,8.0,10.0,6.0,8.0 SURF_ID='Incendio' /
&OBST XB=307.0,317.0,6.0,8.0,4.0,6.0 SURF_ID='Incendio' /
&OBST XB=307.0,317.0,10.0,12.0,8.0,10.0 SURF_ID='Incendio' /
```

Tale risultato è supportato anche dall’immagine in figura n. 14-15-16 che illustrano la diffusione dei fumi all’interno della struttura dopo circa 1.050 secondi.

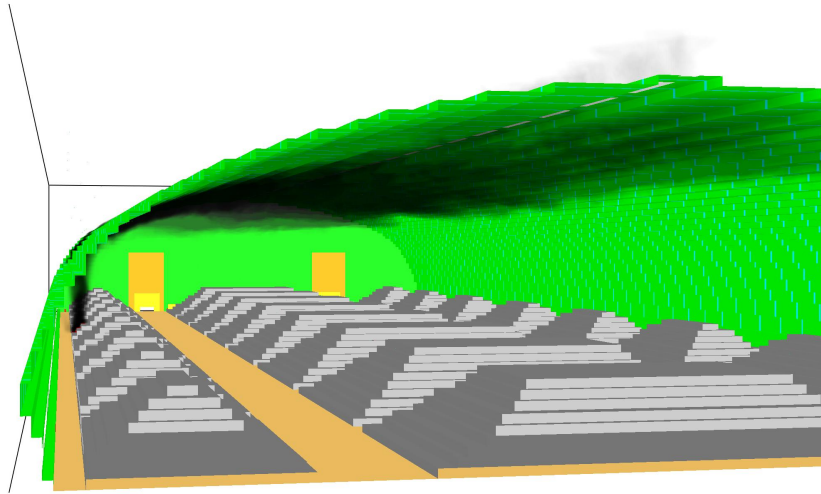


Fig. 14: diffusione dei fumi all'interno della struttura dopo 1.050 secondi

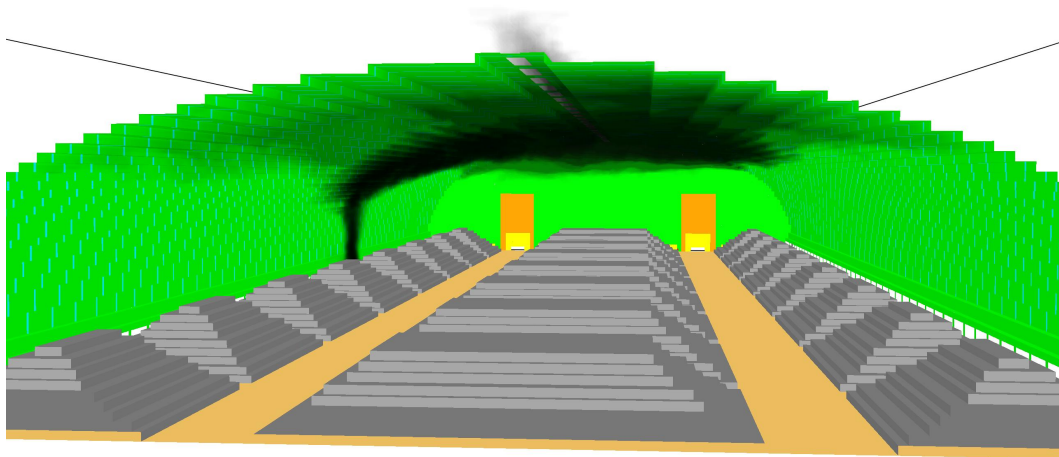
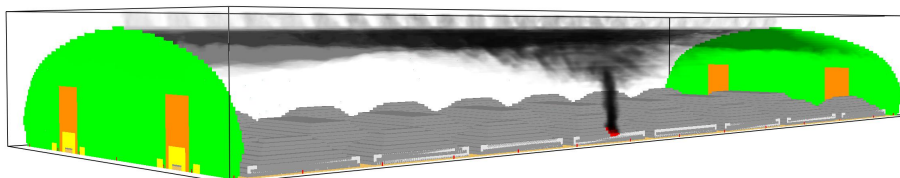


Fig. 15: diffusione dei fumi all'interno della struttura dopo 1.050 secondi



Frame 587  
Time: 1056 s

Fig. 16: diffusione dei fumi all'interno della struttura dopo 1.050 secondi

### 3.2 Rapporto dei dati con gli obiettivi di sicurezza

Sulla base dei risultati ottenuti con la simulazione secondo lo scenario di incendio definito, dopo 1050 secondi:

**1. valutazione dei valori di temperatura massima, al fine di verificare se tali temperature costituiscono un significativo rischio in ordine alla resistenza al fuoco della struttura**

Dai dati emerge che a seguito di un incendio che coinvolge una superficie di circa 100 m<sup>2</sup> con una potenza termica per unità di superficie pari a 660 kW e un potenza termica complessiva pari a 66 MW, le temperature registrate all'interno dell'edificio, nei punti di rilevazione risultano relativamente basse (circa 150-200 °C al massimo in copertura). Le stesse temperature, poi, si stabilizzano una volta raggiunto il picco di potenza massima dopo circa 500 secondi.

Questi valori sono ampiamente compatibili con le temperature critiche dell'acciaio delle strutture portanti, pari a circa 450-500 °C (fattore di sicurezza 2 – 2,5), in considerazione anche delle ipotesi cautelativa impiegate nella simulazione: rateo di combustione aumentato, mancata apertura dei lucernai in polycarbonato, riduzione della superficie efficace di smaltimento fumi per gli aeratori in sommità, assenza di una qualsiasi forma di intervento per i primi 15-17 minuti.

Tali valori sono ritenuti giustificabili grazie alle enormi volumetrie disponibili e alla distanza che intercorre tra la superficie dell'incendio e gli elementi "sensibili" della struttura che varia da circa 10 m a oltre 50 m.

**2. valutazione della diffusione dei fumi per verificare le implicazioni in relazione all'evacuazione degli occupanti e ingresso delle squadre di emergenza**

I dati illustrano che l'incendio di progetto non costituisce un pericolo significativo per la possibilità di evacuazione degli occupanti in quanto l'altezza dei fumi rimane sempre ampiamente sopra il livello di sicurezza.

Inoltre la temperatura raggiunta dai fumi durante lo sviluppo dello scenario è tale da far ritenere il rischio che gli stessi si stratifichino a livelli più bassi e potenzialmente pericolosi sia remoto.

### 3.3 Conclusioni

In conclusione, sulla base dei dati disponibili e dello scenario di incendio sviluppato, è possibile affermare che all'interno della struttura, dopo 1.050 secondi, le condizioni di temperatura siano tali da non generare condizioni di riscaldamento critico negli elementi in acciaio che costituiscono la struttura portante dell'edificio, e che il fumo non costituisca un pericolo per gli occupanti.

Il tecnico

Ing. Tiziano Zuccaro

