



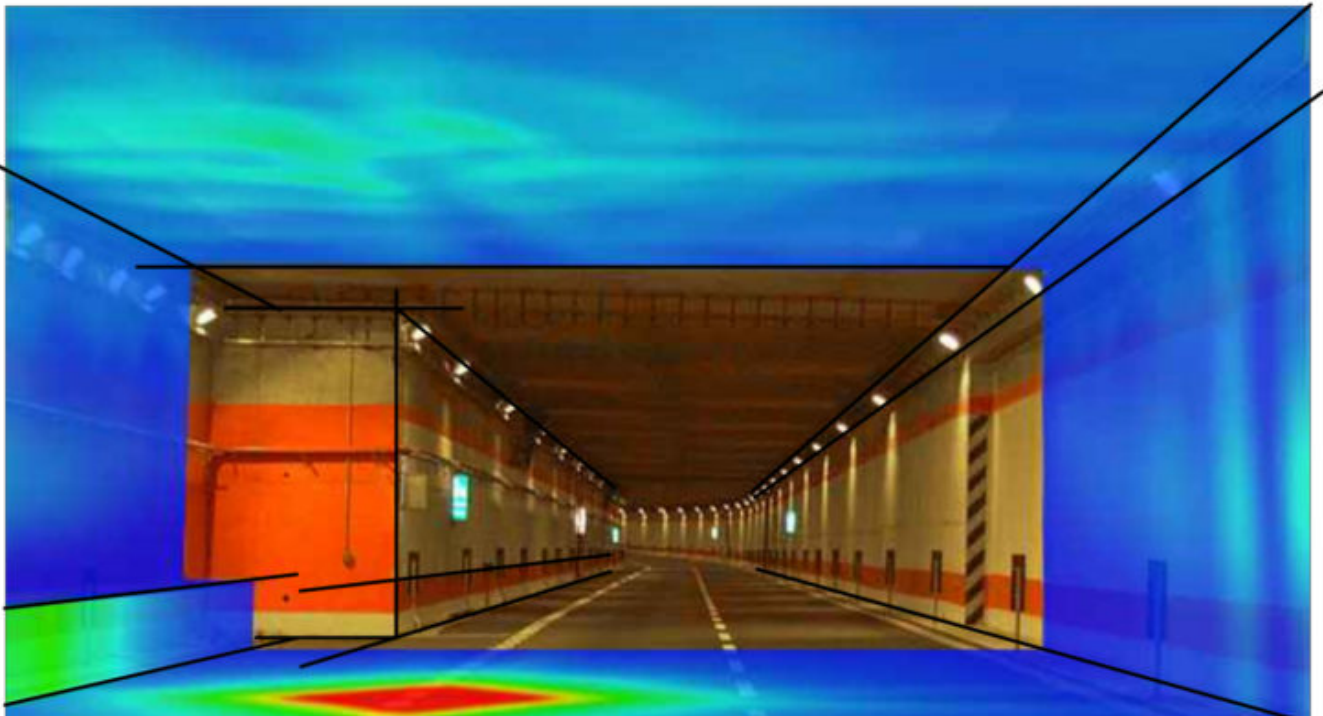
SIMULATORE FDS PER LA FIRE SAFETY ENGINEERING

10 Febbraio 2024,

A cura di Ingegnere G. Basile

Pro Fire – Formazione Professionale Antincendio

direzione@pro-fire.org



Riferimenti normativi e definizioni

1. ISO/TR 13387 Fire safety engineering, Part 1: Application of fire performance concepts to design objectives.
2. DM 9 maggio 2007, Il decreto sulle “Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio” è costituito da otto articoli che stabiliscono l'iter per adottare l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio, in maniera facoltativa, per i procedimenti di esame progetto (nel caso di attività non regolate da specifiche disposizioni antincendio) e di deroga, per i seguenti ambiti di applicazione:
 - in presenza di insediamenti di tipo complesso o a tecnologia avanzata;
 - nel caso di edifici o attività di particolare rilevanza architettonica e/o costruttiva;
 - agli edifici pregevoli per arte o storia o alle attività ubicate in tali edifici;
 - agli edifici ubicati in ambiti urbanistici di particolare specificità.

Un allegato tecnico suddiviso in cinque punti che indicano il processo di valutazione e progettazione nell'ambito dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio (fire safety engineering), con l'indicazione dei passaggi che la documentazione al progetto deve esplicitare in modo adeguato a consentire all'organo di controllo un esame oggettivo:

1. Definizioni
2. Generalità
3. Analisi Preliminare (I fase)
4. Analisi Quantitativa (II fase)
5. Sistema di Gestione della Sicurezza Antincendio (SGSA).

3. DM 3 agosto 2015, Capitolo M.1 Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio
Descrive in dettaglio la metodologia di progettazione dell'ingegneria della sicurezza antincendio (o progettazione antincendio prestazionale) in conformità con i contenuti della serie di rapporti tecnici ISO/TR 13387.

DM 09/05/2007 – APPROCCIO INGEGNERISTICO (ALLEGATO)

1. Definizioni.

- curva di rilascio termico (Heat Release Rate - HRR): energia termica emessa da un focolare o da un incendio per unità di tempo; è espressa in W;
- incendio di progetto: descrizione quantitativa di un focolare previsto all'interno di uno scenario di incendio;
- livelli di prestazione: criteri di tipo quantitativo e qualitativo rispetto ai quali si può svolgere una valutazione di sicurezza;
- processo prestazionale: processo finalizzato a raggiungere obiettivi e livelli di prestazione specifici;
- scenario di incendio: descrizione qualitativa dell'evoluzione di un incendio che individua gli eventi chiave che lo caratterizzano e che lo differenziano dagli altri incendi. Di solito può comprendere le seguenti fasi: innesco, crescita, incendio pienamente sviluppato, decadimento. Deve inoltre definire l'ambiente nel quale si sviluppa l'incendio di progetto ed i sistemi che possono avere impatto sulla sua evoluzione, come ad esempio eventuali impianti di protezione attiva;
- scenario di incendio di progetto: specifico scenario di incendio per il quale viene svolta l'analisi utilizzando l'approccio Ingegnieristico.

Art. 2 del Decreto

Risulta possibile per giustificare proposte progettuali inerenti:

- Insediamenti di tipo complesso o a tecnologia avanzata
- Edifici di particolare rilevanza architettonica e/o costruttiva
- Edifici pregevoli per arte o storia
- Edifici ubicati in ambiti urbanistici di particolare specificità
- Individuazione dei provvedimenti da adottare ai fini del rilascio del certificato di prevenzione incendi nel caso di attività non regolate da specifiche disposizioni antincendio;
- Individuazione delle misure di sicurezza che si ritengono idonee a compensare il rischio aggiuntivo nell'ambito del procedimento di deroga di cui all'art. 6 del DPR 12/01/1998, n. 37

Punto 4.2 allegato DM 09/03/2007

Risulta necessario per la verifica della capacità portante e/o di compartimentazione, rispetto alla curva naturale di incendio, applicata per l'intervallo di tempo necessario al ritorno alla temperatura ordinaria, ovvero applicazione del metodo prestazionale.



La Fire Engineering

L'approccio di tipo ingegneristico – prestazionale (Fire Engineering), seguito per lo più nei Paesi anglosassoni, si basa sulla predizione della dinamica evolutiva dell'incendio tramite l'applicazione di idonei modelli di calcolo (physically sound). Punto di forza di questa strategia è la sua estrema flessibilità, che consente di poter accedere a simulazioni di incendi di complessità anche molto elevate (in teoria i modelli di campo più evoluti non conoscono limitazioni in tal senso), previa valutazione di un certo numero di dati di input (su tutti geometria del dominio di calcolo, condizioni di ventilazione, tipo e quantità del combustibile, curva HRR vs. tempo), da assegnare con dettaglio variabile con la raffinatezza del modello. Per converso i limiti più evidenti di tale approccio risiedono nella problematica validazione sperimentale dei modelli in argomento, data la natura distruttiva delle prove che andrebbero condotte, nella spinta preparazione richiesta ai professionisti ed, ancor più, ai controllori, dato il proliferare negli anni di modelli anche molto diversi tra loro, ed, infine, nel caso di raffinati modelli di campo, in un onere di calcolo non sempre sostenibile con i PC di comune diffusione.

CFD: modelli di calcolo

La fluidodinamica computazionale (CFD) è una branca della meccanica dei fluidi che si occupa di prevedere il comportamento dei fluidi in movimento, il trasporto di calore, il trasporto di materia, le

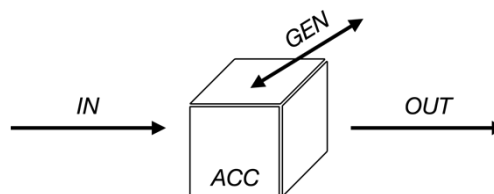
reazioni chimiche e i fenomeni ad esse correlati, risolvendo tramite simulazione numerica le equazioni matematiche che governano questi processi.

I modelli a parametri concentrati (o parametrici od a zone)

I modelli a parametri concentrati risolvono in modo esatto un set di equazioni approssimate di conservazione di quantità di moto, energia e materia, algebriche (stato stazionario) o differenziali (transitorio). Il dominio di calcolo è diviso in due o più volumi a perfetta miscelazione, nei quali si assume che le proprietà intensive (pressione, temperatura, concentrazione delle specie) siano omogenee. L'output standard di detti modelli è costituito dal valore delle proprietà intensive allo stato stazionario e / o dai loro profili temporali.

I modelli a parametri distribuiti (o numerici o di campo)

I modelli numerici euleriani implementati in software commerciali di fluidodinamica computazionale (CFD) costituiscono di gran lunga la più raffinata possibilità di simulazione di incendio attualmente disponibile. La CFD consente, tramite integrazione numerica delle equazioni differenziali rappresentative dei bilanci accoppiati di quantità di moto, energia e materia, di pervenire al calcolo dei campi vettoriali di velocità e scalari di temperatura e concentrazione.



$$ACC = IN - OUT + GEN$$

Bilancio di energia

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = - \nabla \cdot \mathbf{q} + \sigma : \nabla \mathbf{u} - \left. \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln T} \right|_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p \right) + S$$

c_p [J kg⁻¹ K⁻¹] calore specifico

T [K] temperatura

$\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z)$ [J m⁻² s⁻¹] flusso termico conduttivo

$:$ doppio prodotto scalare

S [J m⁻³ s⁻¹] generazione specifica di energia termica

Originariamente concepito per applicazioni prettamente industriali, questo potente strumento di calcolo è stato più recentemente applicato con risultati lusinghieri nei più disparati campi, dall'ambientale al biomedico. I principali pregi della CFD risiedono nella sua estrema flessibilità, ben maggiore rispetto agli altri modelli euleriani (infatti in linea di principio essa può essere adoperata per la modellazione di qualsivoglia fenomeno di trasporto), testimoniata dalla sua citata applicazione ad ambiti anche molto diversi tra loro, e nella capacità di trattare geometrie anche estremamente

complesse, con la possibilità di descriverle in minuzioso dettaglio, tramite la costruzione di griglie flessibili molto particolareggiate, e di imporvi una tipologia di condizioni al contorno molto diversificata, grazie all'uso di pre-processor via via sempre più user - friendly.

Qualora poi il flusso da modellare sia turbolento, come nel caso della simulazione di incendio seguito da propagazione e dispersione dei prodotti di combustione, in atmosfera (incendio non confinato), in compartimento delimitato da pareti (incendio confinato), in situazioni intermedie (incendio semi - confinato), la capacità di modellazione, anche abbastanza raffinata, della turbolenza garantita dalla CFD, sconosciuta ai modelli parametrici, costituisce un ulteriore vantaggio che ne rende particolarmente invitante l'uso. Per converso, il più evidente limite di questo strumento di calcolo risiede nel suo onere computazionale, sicuramente ben maggiore rispetto a quello richiesto dagli altri modelli di incendio disponibili. Ciò giustifica come solo in tempi relativamente recenti, con l'avvento di calcolatori sensibilmente più performanti, che la CFD abbia conosciuto una più massiccia diffusione.

La struttura dei codici commerciali CFD si articola generalmente in tre parti fondamentali (pre - processore, solutore, post - processore), deputate ad eseguire ciascuna delle tre fasi della simulazione.

PRE-PROCESSORE – SOLUTORE.

Di esse, il pre - processore consente la descrizione geometrica del dominio di integrazione, la sua discretizzazione spaziale tramite la generazione di una opportuna griglia, la specificazione della tipologia delle sue frontiere. Il dominio così generato può essere poi importato dal solutore, che, come il suo stesso nome suggerisce, permette di assegnare le condizioni iniziali ed al contorno, eseguire tutte le residue scelte, modellistiche e numeriche, richieste per la corretta definizione del problema. Esso poi integra numericamente le equazioni accoppiate di trasporto, approssimando numericamente le variabili di flusso incognite, discretizzando nel tempo e nello spazio le equazioni in argomento e risolvendo, infine, il risultante sistema di equazioni algebriche.

POST-PROCESSORE.

I risultati così ottenuti possono poi essere visualizzati e/o elaborati grazie al post - processore, il quale, segnatamente, consente, ad es., di visualizzare la geometria del dominio di integrazione e la sua griglia, di rappresentare graficamente i campi vettoriali e scalari e, nel caso di simulazioni in transitorio, può addirittura permettere di eseguire animazioni filmate che illustrino l'evoluzione dinamica delle grandezze di interesse.

Nel caso di applicazione della CFD alla simulazione di incendio, i principali dati specifici richiesti in input sono la geometria del dominio di integrazione, la tipologia di materiali costituenti la frontiera ed i parametri caratteristici della curva HRR (Heat Release Rate: velocità del rilascio termico) vs. tempo. Riguardo la descrizione della geometria va rimarcato che i comuni software commerciali di CFD consentono di trattare sostanzialmente qualunque tipo di incendio in ambiente non confinato, confinato con eventuali aperture, semi - confinato. La forma del dominio di integrazione, inoltre, fornisce spesso chiare indicazioni sul tipo di griglia più indicato per la discretizzazione del dominio stesso. Le proprietà di trasporto dei materiali di cui è costituita la frontiera del compartimento sono determinanti per la valutazione della quantità di dispersione termica. Infine la curva HRR vs. tempo consente di portare in conto, oltre che il potenziale termico totale dei materiali combustibili presente (per la qual cosa sarebbe bastato conoscere i valori del potere calorifico), la velocità con la quale esso viene liberato durante la combustione. Al riguardo va ricordato che i modelli di calcolo attualmente disponibili non modificano il valore di HRR al diminuire del livello di ossigeno. Per tale ragione si deve sempre verificare che HRR sia compatibile con l'ossigeno presente nell'ambiente.

Definizioni:

CFD Modelli di Calcolo: DNS Simulazione numerica diretta

La simulazione numerica diretta è un modello matematico usato nella fluidodinamica computazionale per risolvere numericamente le equazioni di Navier-Stokes senza l'impiego di un modello approssimato per la turbolenza, che limiti le scale spaziali e temporali su cui effettuare l'integrazione. Per tale ragione la DNS è tanto precisa nel calcolo quanto onerosa dal punto di vista computazionale.

CFD Modelli di Calcolo: RANS – Equazioni di Navier-Stokes mediate

Le RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sono equazioni impiegate nella fluidodinamica computazionale e vedono le grandezze presenti nelle equazioni di Navier-Stokes mediate in un intervallo temporale, abbastanza piccolo da permettere variazioni delle grandezze nell'intervallo temporale da simulare e, inoltre, abbastanza grande da trascurare le fluttuazioni aleatorie derivanti dal moto turbolento.

Equazione di Navier-Stokes

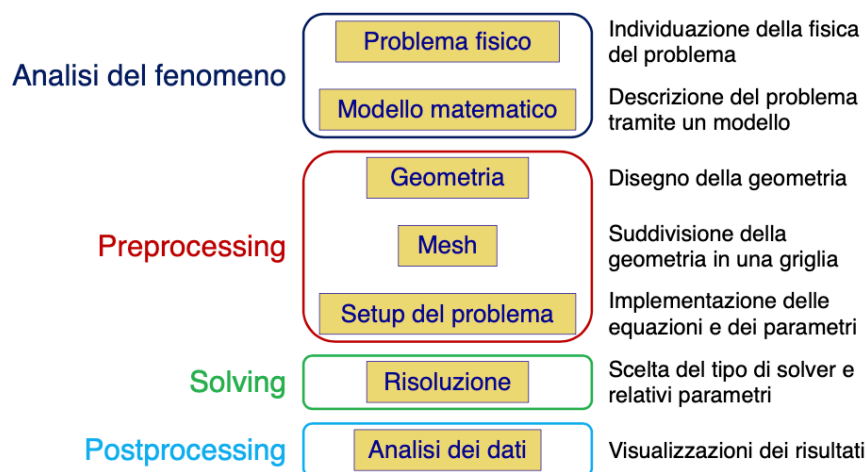
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

CFD Modelli di Calcolo: LES – Large Eddy Simulation

La LES è un modello matematico impiegato nella fluidodinamica computazionale per la risoluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes e include anche il calcolo della turbolenza. La simulazione diretta del moto turbolento ha un alto onere computazionale: per questa ragione, con la LES si adotta un filtro per ignorare nel calcolo i vortici di dimensioni più piccole tipici del moto turbolento e considerare solo i più grandi.

Riassumendo le fasi di una simulazione numerica:



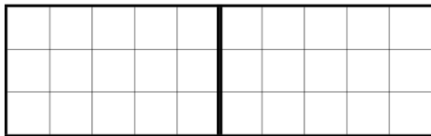
Geometria e mesh

La geometria può essere di tipo semplice o più complessa. Come primo approccio risulta fondamentale lavorare sulla discretizzazione della geometria e su quanto deve risultare fitta la mesh.

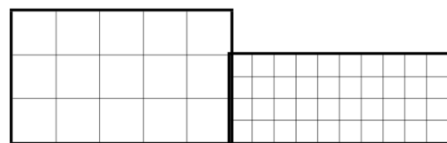


La convergenza della mesh è un'operazione che consiste nella reiterazione della stessa simulazione, con una mesh più fitta a ogni tentativo. Il procedimento si interrompe quando la differenza dei valori misurati con la simulazione è inferiore a un livello di tolleranza (tipicamente 2 o 3%). L'esperienza permette di individuare le condizioni più critiche per un problema e ridurre la convergenza della mesh a poche iterazioni.

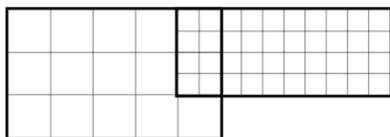
Allineamenti della mesh ammessi in FDS 1/3



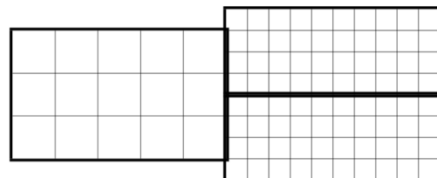
Allineamenti della mesh ammessi in FDS 2/3



Allineamenti della mesh ammessi in FDS 3/3



Allineamenti della mesh non ammessi in FDS 2/3



Esempi con FDS e SMV

Definizioni:

Fire Dynamics Simulator (FDS) è un codice di simulazione numerica sviluppato dal N.I.S.T. per simulare il comportamento di un incendio con particolare enfasi sui fumi e sul trasporto di calore da esso derivanti.

Smokeview (SMV) è il programma sviluppato dal N.I.S.T. per visualizzare i risultati delle simulazioni numeriche realizzate con FDS e CFAST, altro codice di simulazione numerica sviluppato sempre dal N.I.S.T.

Esempio 1.

Scopo della simulazione

Si vuole simulare la combustione prodotta da un bruciatore all'interno di una stanza a pianta rettangolare, con base 4 m x 3,2 m, altezza 2,4 m e con una faccia completamente aperta in corrispondenza del lato più lungo. Si vuole osservare la variazione della temperatura all'interno della stanza con delle sezioni lungo due direzioni tra loro ortogonali.

Si imposta il tempo di simulazione: 1 min.

```
&TIME T_END=0. /  
&DUMP NFRAMES=0 /
```

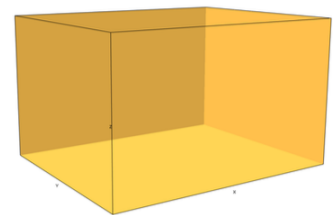
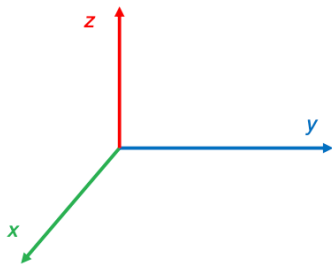


```
&TIME T_END=60. /  
&DUMP NFRAMES=60 /
```

Si calcola la geometria e le mesh

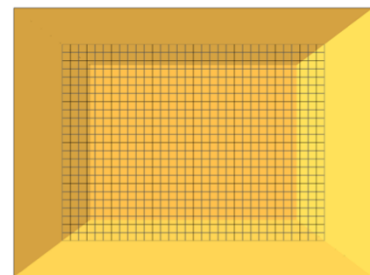
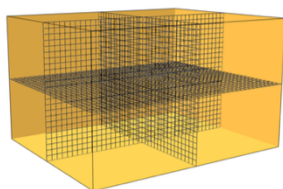
```
&MESH IJK=0,0,0, XB=0,0,0,0,0,0 /
```

```
&MESH IJK=0,0,0, XB=0.0,4.0,0.0,3.2,0.0,2.4 /
```



```
&MESH IJK=40,32,24, XB=0.0,4.0,0.0,3.2,0.0,2.4 /
```

```
&MESH IJK=40,32,24, XB=0.0,4.0,0.0,3.2,0.0,2.4 /
```



Si calcola la reazione chimica – bruciatore

```
&REAC FUEL='METHANE' /  
&OBST XB=1.5,2.5,1.1,2.1,0.0,0.5, COLOR='IVORY BLACK' /  
&VENT XB=1.5,2.5,1.1,2.1,0.5,0.5, RGB=96,96,96,  
      SURF_ID='bruciatore' /  
&SURF ID='bruciatore', HRRPUA=250 /
```

Il parametro HRRPUA definisce la potenza termica prodotta per unità di superficie in kW/m².

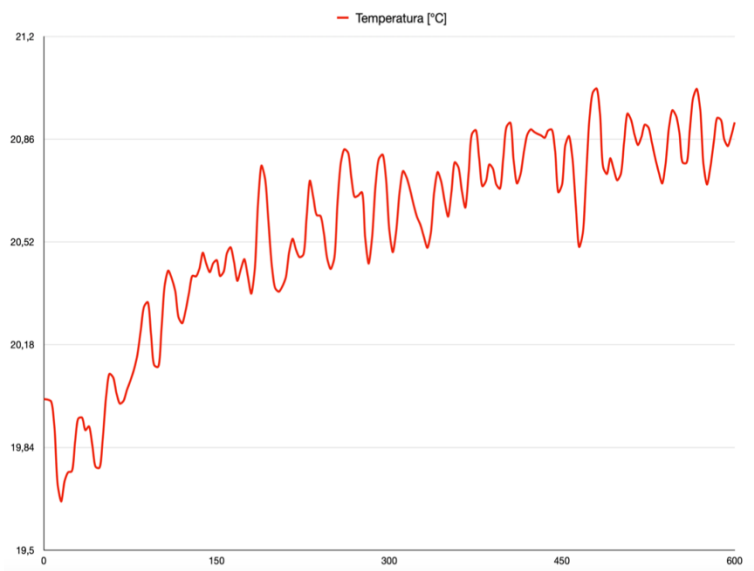


Visualizzazione del parametro TEMPERATURA

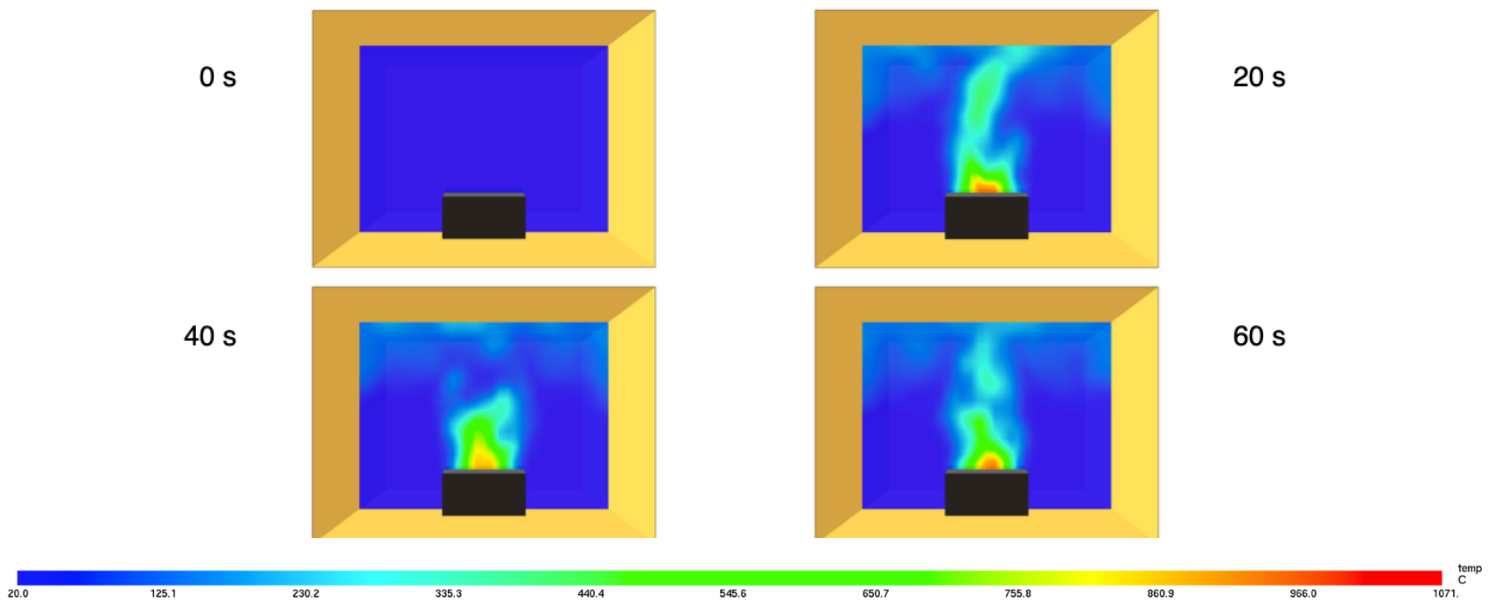
```
&SLCF PBX=2.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /  
&SLCF PBY=1.6, QUANTITY='TEMPERATURE' /
```



Temperatura rilevata dal sensore posizionato



Visualizzazione del parametro temperatura dopo 0, 20, 40 e 60 secondi.



CONCLUSIONE

Le simulazioni numeriche hanno diversi vantaggi, quali:

- Costo contenuto rispetto le prove sperimentali,
- Le misure di calcolo vengono ricavate velocemente,
- Il cambiamento dei parametri e delle condizioni è immediato
- È possibile simulare in condizioni reali e ideali
- Si può ricavare il valore di ogni grandezza in tutto il dominio

D'altro canto però risulta necessario possedere un livello di conoscenza della materia piuttosto elevato e sviluppare modelli matematici accurati. La conseguenza di modelli approssimati, falsa i risultati rendendoli non realistici al tipo di situazione da valutare. Gli errori numerici precludono la possibilità di verificare l'esattezza del risultato.

Lasciando il lettore con delle domande che possono creare degli spunti di riflessione:

1. In quali situazioni è più vantaggioso utilizzare simulazioni numeriche al posto delle prove sperimentali?
2. Cosa rende un modello matematico accurato e quali sono gli elementi base che vanno studiati prima di effettuare la simulazione?
3. Quanto incide la convergenza delle mesh sul calcolo?

Riferimenti Bibliografici/Sitografici:

- FIRE SAFETY ENGINEERING: una applicazione, ISTITUTO SUPERIORE ANTINCENDI ROMA, C. Barbera, A. Bascià, G. di Salvo, A. Galfo, R. Lala, S. Lucidi, D. Maisano, G. Mancini, V. Puccia, F. Vorraro.
- Esempi pratici di FDS, Ingegnere Andrea Massimo Carbonaro, Pro Fire 2024.
- Fire Safety Engineering PROCESSO DI VALUTAZIONE E PROGETTAZIONE, Relatore: Ing. Pietro Monaco p.monaco. Partecipa al G.L. UNI “Ingegneria della sicurezza contro l'incendio”.
- <https://www.fseprogetti.it/approfondimenti/la-propagazione-dellincendio-in-fds/>
- <https://antincendio-italia.it/sicurezza-delle-infrastrutture-stradali-il-ruolo-chiave-delle-simulazioni-numeriche/>