

Articoli sul mondo della prevenzione incendi

## ALL'INTERNO

### Le scoperte del mese

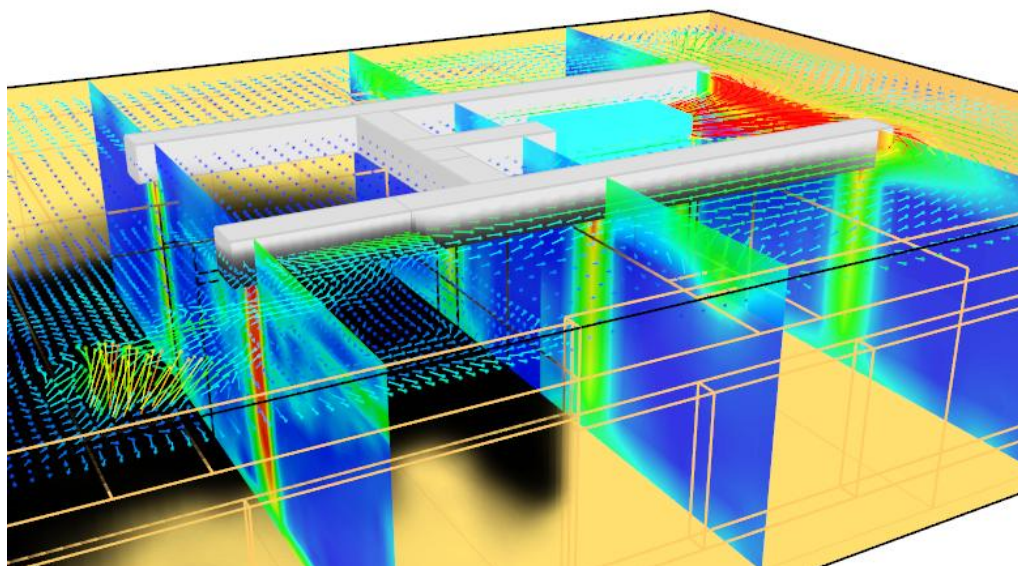
Individuiamo le tematiche più interessanti

### Newsletter aziendale

Ogni mese ci trovate online sul sito di ProFire

### L'osservatore

Collaboriamo con professionisti, aziende e vigili del fuoco

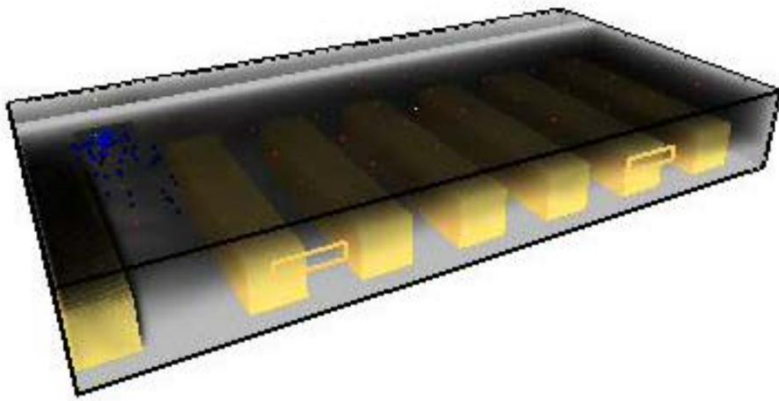


## Sensibilità nella modellazione CFD per la progettazione antincendio

- di **Ing. Andrea Massimo Carbonaro** e **Dott. Maurizio Antonelli**

La modellazione CFD applicata alla progettazione antincendio rappresenta uno strumento estremamente potente, ma al tempo stesso delicato, perché fortemente dipendente dai parametri di input. Anche variazioni apparentemente minime possono generare differenze significative nei risultati, con implicazioni rilevanti sul piano tecnico e della sicurezza.

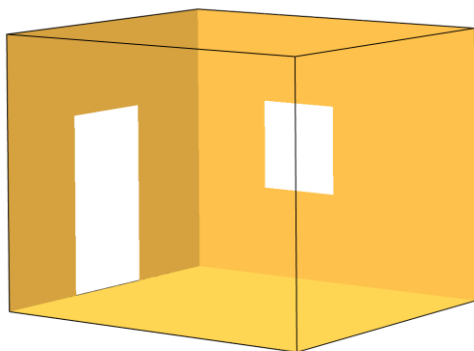
Un riferimento normativo importante è la UNI EN 1991-1-2, che fornisce indicazioni sulle azioni termiche da incendio e introduce concetti fondamentali come le curve di incendio nominali e naturali. Tuttavia, nel contesto CFD, tali indicazioni devono essere tradotte in condizioni di input numeriche, lasciando inevitabilmente spazio a interpretazioni e assunzioni.



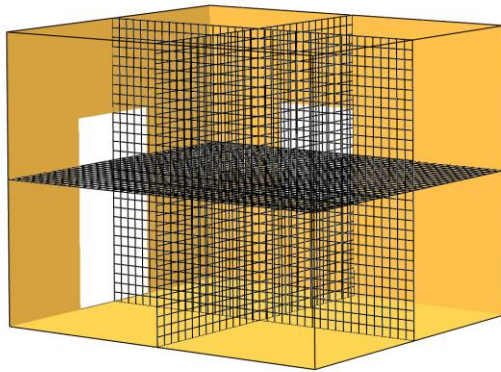
# L'ingegneria della sicurezza antincendio con i modelli CFD

L'ingegneria della sicurezza antincendio prevede, per i progetti di maggiore complessità, la possibilità di ricorrere a modelli numerici avanzati per rappresentare, visivamente e quantitativamente, gli effetti degli scenari d'incendio selezionati per i progetti.

L'impiego di modelli numerici avanzati come quelli di fluidodinamica computazionale (CFD, dall'inglese *computational fluid dynamics*) richiede da parte del professionista antincendio una profonda conoscenza sia della combustione dei materiali presenti nell'attività che si intende progettare, sia degli effetti dell'incendio e di come questi possono svilupparsi ed evolvere all'interno dell'attività. La sola conoscenza di questi fenomeni, per quanto vasta possa essere, non è sufficiente per un'applicazione efficace della CFD: infatti, risultano fondamentali anche le conoscenze relative alla modellazione del fenomeno tramite equazioni alle derivate parziali, alla loro risoluzione tramite un metodo che si va a scegliere e alla costruzione della geometria del modello all'interno del calcolatore.



**Figura 1** Dominio di calcolo ottenuto tramite SMV 6.10.1.



**Figura 2** Dominio di calcolo diviso in celle per la realizzazione della *mesh*, ottenuto tramite SMV 6.10.1.

## Lo studio della *mesh*

I modelli numerici avanzati di CFD consentono di descrivere accuratamente la dinamica di un incendio all'interno di uno o più locali, risolvendo le relative equazioni differenziali alle derivate parziali.

Le equazioni in questione rappresentano la formulazione matematica delle leggi fisiche di conservazione della materia, della quantità di moto e dell'energia; la loro risoluzione contemporanea richiede un processo iterativo ed è per questo motivo che l'impiego di un calcolatore risulta fondamentale al fine di realizzare un progetto basato sull'applicazione di modelli CFD.

Nell'affrontare la risoluzione dell'equazioni, il modello ha necessità di dividere il dominio di calcolo in un numero finito di celle per valutare puntualmente l'evoluzione dei parametri calcolati tramite le equazioni. La suddivisione del dominio di calcolo in volumi discreti al fine di risolvere puntualmente le equazioni alle derivate parziali tipiche della CFD è nota come *mesh*.

La *mesh* è un parametro fondamentale per la risoluzione numerica delle equazioni poiché tanto più è fitta, cioè in tanti più volumi discreti è stato suddiviso il dominio di calcolo, tanto più accurato sarà il risultato finale. Il numero di celle componenti la *mesh* è importante da un lato, poiché un valore elevato consente di avere risultati più precisi e vicini alla realtà; dall'altro, un maggiore numero di celle comporta un più alto onere computazionale, cioè la quantità di risorse hardware (per esempio, potenza di calcolo della CPU, memoria RAM) necessarie per risolvere numericamente le equazioni alle derivate parziali.

Emerge chiaramente la necessità di trovare un equilibrio per il numero di celle che compongono la *mesh*: le celle, infatti, devono essere in numero tale da ottenere dei risultati quanto più precisi possibile e, al tempo stesso, non richiedere costi computazionali eccessivi. Si parla in questo caso di convergenza della *mesh*: si realizza un processo iterativo sul dominio di calcolo che prevede di partire da una discretizzazione che si va a infittire di tentativo in tentativo, finché l'errore percentuale sulla grandezza che si sta calcolando può essere ritenuto trascurabile. Riferendosi a una generica grandezza  $A$  (per esempio, la temperatura, la concentrazione di CO o la velocità dell'aria aspirata da un SEFC) e

## Mesh (griglia di calcolo)

La discretizzazione dello spazio influisce direttamente sulla risoluzione dei fenomeni fisici simulati.

Mesh troppo grossolane portano perdita di dettagli e a una sottostima dei gradienti termici e della velocità dei fumi.

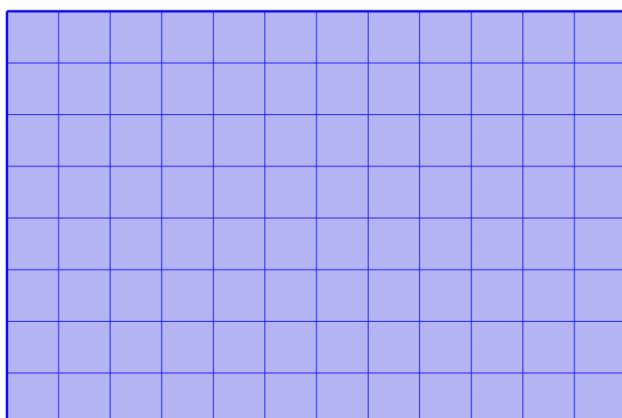
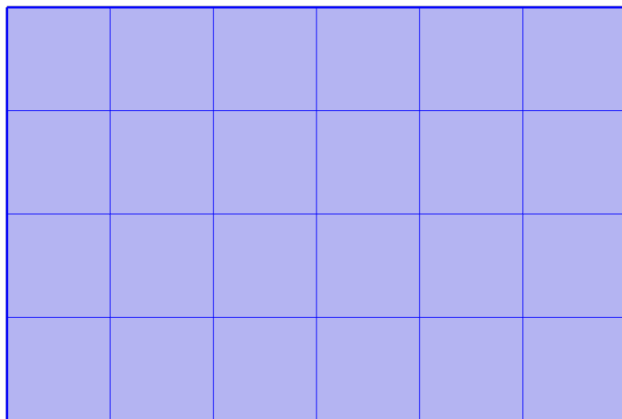
Mesh troppo fini comportano un aumento esponenziale dei tempi di calcolo.

indicando con  $M_i$  la *mesh*  $i$ -esima, si può esprimere l'errore percentuale con la seguente relazione:

$$err \% = \left| \frac{A_{M_i} - A_{M_{i+1}}}{A_{M_i}} \right| \cdot 100.$$

Il valore dell'errore percentuale entro il quale ricadere dipende dalla valutazione del professionista antincendio dipendentemente dalla grandezza che si sta esaminando, dall'importanza del calcolo che si appresta ad affrontare e dall'onere computazionale.

Lo studio della convergenza della *mesh* può essere condotto, piuttosto che sul dominio di calcolo, anche su una sua porzione oppure su un dominio a parte di dimensioni più contenute: così facendo si realizza un *benchmark*, ovvero una prova al fine di verificare le prestazioni del calcolatore nei confronti della simulazione numerica del modello che si è realizzato. In questo modo la convergenza della *mesh* può essere condotta più celermente, verificando anche che il calcolatore offra delle prestazioni adeguate.



**Figura 3** Dominio 2D diviso in 24 celle (sinistra) e 96 celle (destra). I parametri risultanti da una simulazione condotta sul dominio a destra saranno più accurati rispetto a quelli valutati col dominio a sinistra, al costo di un maggiore onere computazionale.

## Curva di rilascio termico (RHR)

La curva RHR è uno dei parametri più influenti in assoluto.

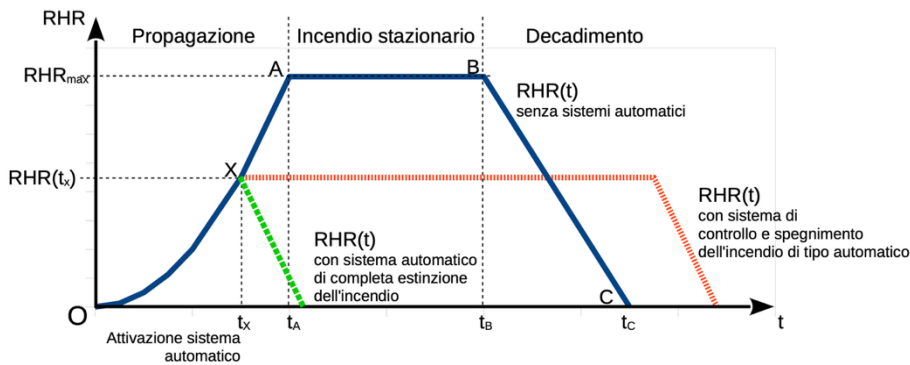
Piccole variazioni nel picco di potenza o nella velocità di crescita dell'incendio possono modificare drasticamente temperatura, stratificazione dei fumi e visibilità.

L'incertezza deriva spesso dalla difficoltà di caratterizzare realisticamente il carico d'incendio e i materiali presenti.

## Il peso relativo del software

Un aspetto spesso sottovalutato è che, a parità di modello fisico (ad esempio basato sulle equazioni di

Navier-Stokes per flussi turbolenti reattivi), la scelta del software incide meno rispetto alla definizione del modello stesso. In altre parole, due simulazioni eseguite con software diversi ma con input coerenti tendono a convergere, mentre lo stesso software con input differenti può produrre risultati completamente divergenti.

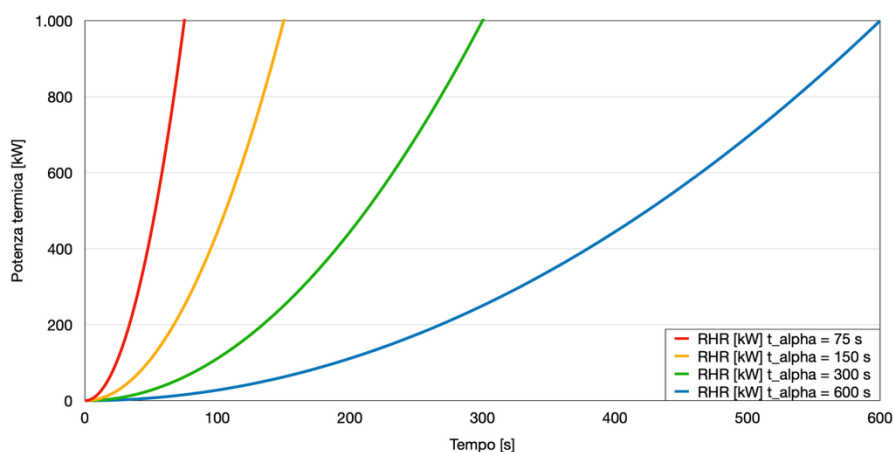


## L'influenza della curva RHR

La curva RHR è alla base dell'ingegneria della sicurezza antincendio, poiché da essa è possibile determinare più parametri fondamentali per una progettazione prestazionale nei confronti della prevenzione incendi.

Dallo studio della curva RHR si possono determinare, nello specifico, due parametri di enorme interesse: la velocità caratteristica di crescita dell'incendio e il valore massimo di RHR. Entrambi i parametri possono essere ricavati tramite la consultazione di tabelle reperibili in letteratura oppure conducendo uno studio sui materiali combustibili presenti nell'attività; in ogni caso, il professionista antincendio tiene conto di questi due valori nella definizione dello scenario di incendio che intende sottoporre al calcolo numerico.

La velocità caratteristica di crescita dell'incendio è un parametro chiave per determinare il tempo necessario affinché gli occupanti possano abbandonare il compartimento di primo innesco senza essere interessati dagli effetti dell'incendio. L'attribuzione di questo parametro ai compartimenti antincendio è un procedimento che il professionista antincendio compie abitualmente con il Codice di prevenzione incendi, quando conduce la valutazione del profilo  $R_{vita}$ ; per una valutazione più approfondita si può anche fare riferimento alla parte 2 dell'Eurocodice 1. In generale, è interessante osservare il confronto grafico tra le curve RHR nella fase di propagazione al variare della velocità caratteristica di crescita dell'incendio: in questo modo, infatti, è possibile apprezzare maggiormente come una velocità caratteristica di crescita dell'incendio quanto più lenta possibile consenta di guadagnare molto tempo per l'esodo degli occupanti. La velocità caratteristica più lenta riscontrabile in



**Figura 4** Andamento della curva RHR nella fase di propagazione al variare della velocità caratteristica di crescita dell'incendio.

letteratura corrisponde a un tempo di 600 s, ma conducendo uno studio dei materiali combustibili presenti nel compartimento il professionista antincendio può individuare, se le caratteristiche dei materiali lo consentono, tempi anche più lunghi e porsi per il progetto in condizioni di maggiore sicurezza.

Il valore massimo di RHR, rappresentando la massima quantità di potenza termica che viene rilasciata durante l'incendio, fornisce al professionista antincendio informazioni importanti per determinare, per l'esodo, il calore che per irraggiamento può riguardare gli occupanti, e, per la compartimentazione, la resistenza che gli elementi strutturali sono in grado di offrire nei confronti dell'incendio. Il valore massimo di RHR può essere ricavato da un'analisi della letteratura a riguardo, trovando più valori per altrettante destinazioni d'uso dei compartimenti. Il professionista antincendio, anche in questo caso, può condurre uno studio sui materiali combustibili presenti nel compartimento oggetto della progettazione antincendio e individuare un valore massimo di RHR specifico.

## L'importanza delle condizioni al contorno

Le equazioni differenziali alle derivate parziali sfruttate dai modelli CFD richiedono per la loro risoluzione delle condizioni al contorno, ovvero dei vincoli che si impongono in corrispondenza dei contorni del dominio. Un esempio di condizione al contorno è la velocità di uscita dell'aria che si impone in corrispondenza del punto di estrazione di un sistema di evacuazione forzata del fumo e del calore.

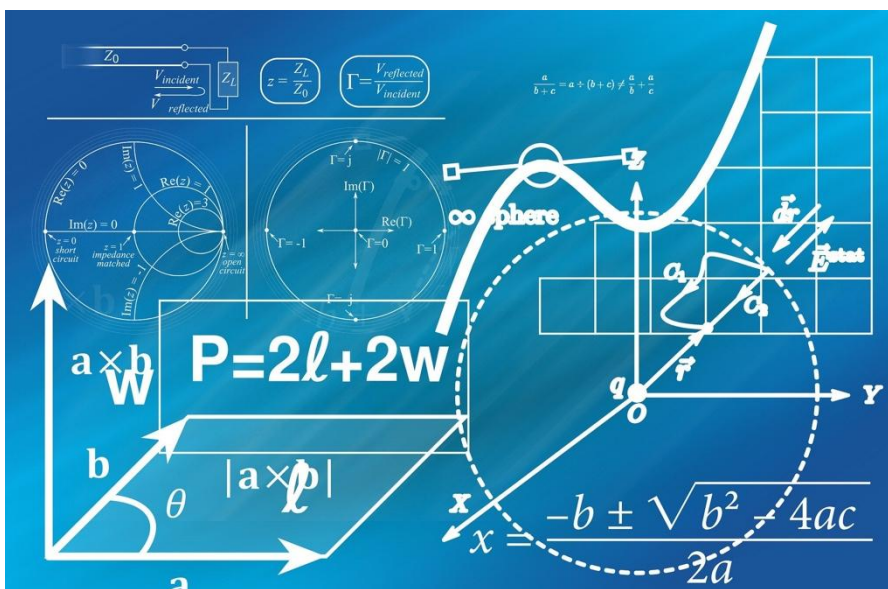
Le equazioni di conservazione della materia, della quantità di moto e dell'energia sono estremamente sensibili alle condizioni al contorno: cambiando leggermente anche solo una delle condizioni, si può ottenere un risultato della simulazione completamente diverso rispetto alla condizione di partenza. Qui la conoscenza della prevenzione incendi in tutte le sue sfaccettature, unita a quella delle equazioni di conservazione citate precedentemente, consente effettivamente al professionista antincendio di realizzare un progetto valido. Se il risultato della simulazione rappresenta realisticamente lo scenario d'incendio, è solo merito del professionista, che ha individuato le condizioni al contorno

## Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno definiscono il "dialogo" tra il modello e l'ambiente esterno:

- le aperture influenzano la ventilazione e, di conseguenza, lo sviluppo dell'incendio;
- le condizioni termiche delle superfici determinano l'irraggiamento;
- i sistemi di protezione attiva, a loro volta, sono altamente sensibili a ipotesi progettuali.

Anche piccole variazioni (es. coefficiente di scambio termico o dimensione di un'apertura) possono alterare significativamente i risultati.



(risultanti di valutazioni condotte su più misure antincendio) più adatte per descrivere il fenomeno dell'incendio all'interno dei compartimenti costituenti l'attività interessata dal progetto. L'incertezza nei confronti delle misure adottate e la comprensione parziale dei fenomeni della combustione e della dinamica dell'incendio rappresentano dei seri ostacoli per il progettista nella selezione delle soluzioni al contorno e, di conseguenza, nella realizzazione di un progetto antincendio che sfrutta un modello CFD.

L'importanza delle condizioni al contorno può essere compresa ancora meglio pensando al valore massimo di RHR di cui si è parlato in precedenza. Se sono presenti delle aperture, queste possono influenzare l'andamento dell'incendio intervenendo sulla ventilazione. Un incendio controllato dalla ventilazione presenta un valore ridotto per il massimo di RHR rispetto a un incendio controllato dal combustibile: intervenendo sulle aperture durante la progettazione, quindi, è possibile ridurre la potenza termica generata dall'incendio. La scelta delle condizioni al contorno influenza il risultato della simulazione numerica così come la scelta di un ambiente più ventilato influenza l'evoluzione dell'incendio.

Il professionista antincendio, nella scelta delle condizioni al contorno, deve essere abile nel tradurre le caratteristiche geometriche e le misure antincendio adottate in un linguaggio matematico adeguato alla risoluzione numerica delle equazioni di conservazione sfruttate dai modelli CFD.

## La responsabilità del professionista antincendio

Il professionista antincendio ha normalmente un'enorme responsabilità nel momento in cui si occupa del progetto di un'attività e degli adempimenti ad essa collegati. Quando il progetto è realizzato con un approccio prestazionale che coinvolge modelli CFD, la responsabilità del professionista antincendio è ancora maggiore: i risultati delle simulazioni numeriche riguardanti gli scenari d'incendio selezionati per il progetto sono resi validi dal professionista stesso. I software, che siano liberi o proprietari, permettono di realizzare simulazioni numeriche i cui risultati sono conseguenza delle equazioni differenziali rappresentanti il modello

## Responsabilità professionale

Il punto centrale è proprio questo: la CFD è uno strumento di supporto decisionale, non un sostituto del giudizio tecnico.

Il professionista definisce le ipotesi alla base della selezione dei dati di input, interpreta i risultati e valuta la loro affidabilità.

Di conseguenza, la responsabilità della validazione del modello e delle conclusioni progettuali è interamente sua.



e delle loro condizioni iniziali e al contorno; nel momento in cui il professionista antincendio li ritiene validi, allora i risultati acquisiscono un valore vero e proprio.

Con l'approccio prestazionale, il progetto antincendio si basa effettivamente sulle conoscenze e sulle competenze del professionista antincendio: non esistono soluzioni che possono essere applicate direttamente dopo aver consultato una tabella, ma metodi risolutivi che portano a risultati la cui verifica spetta a chi è realmente esperto del fenomeno dell'incendio.

La firma del professionista antincendio sul progetto, nel caso dell'approccio prestazionale e ancor più se si adottano modelli CFD, non serve solo a riconoscere la persona fisica che si è occupata dell'attività, ma anche a rendere valido tutto il lavoro realizzato tramite i modelli di calcolo. Le simulazioni numeriche servono a verificare che le ipotesi nei confronti di uno scenario d'incendio siano corrette: per questa ragione, solo un professionista esperto della materia può adottare questa metodologia di progettazione e, conseguentemente, firmare le carte relative al progetto.

## Conclusione

La progettazione antincendio che impiega i modelli CFD presenta molti elementi che richiedono attenzione da parte del professionista antincendio: una discretizzazione del dominio adeguata a produrre risultati con il minor margine possibile di errore, la selezione di condizioni al contorno adeguate alla descrizione dell'ambiente oggetto della simulazione e la scelta di dati di input quanto più aderenti alla realtà. Si tratta di un processo che richiede rigore e giudizio critico, nonché una notevole assunzione di responsabilità da parte del professionista antincendio.

Solo comprendendo questi elementi il professionista antincendio può compiere quel passo in avanti e adottare i modelli CFD, con la consapevolezza dei limiti e delle enormi potenzialità di questi strumenti.

### Bibliografia

Forney G.P., *Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, Volume I: User's Guide*, NIST Special Publication 1017-1, Sixth Edition, 2025

McGrattan K. , McDermott R., Vanella M., Mueller E., Hostikka S., Floyd J. e Paul C., *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model*, NIST Special Publication 1018-1, Sixth Edition, 2025

McGrattan K. , McDermott R., Vanella M., Mueller E., Hostikka S., Floyd J. e Paul C., *Fire Dynamics Simulator User's Guide*, NIST Special Publication 1019, Sixth Edition, 2025

Ministero dell'Interno, *Codice di prevenzione incendi*, Allegato I al D.M. 3 agosto 2015 e s.m.i.

UNI EN 1991-1-2:2024 *Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco*

direzione@pro-fire.org

