



dipartimento
di ingegneria
e architettura

MODULO 1 • LEZIONE 7

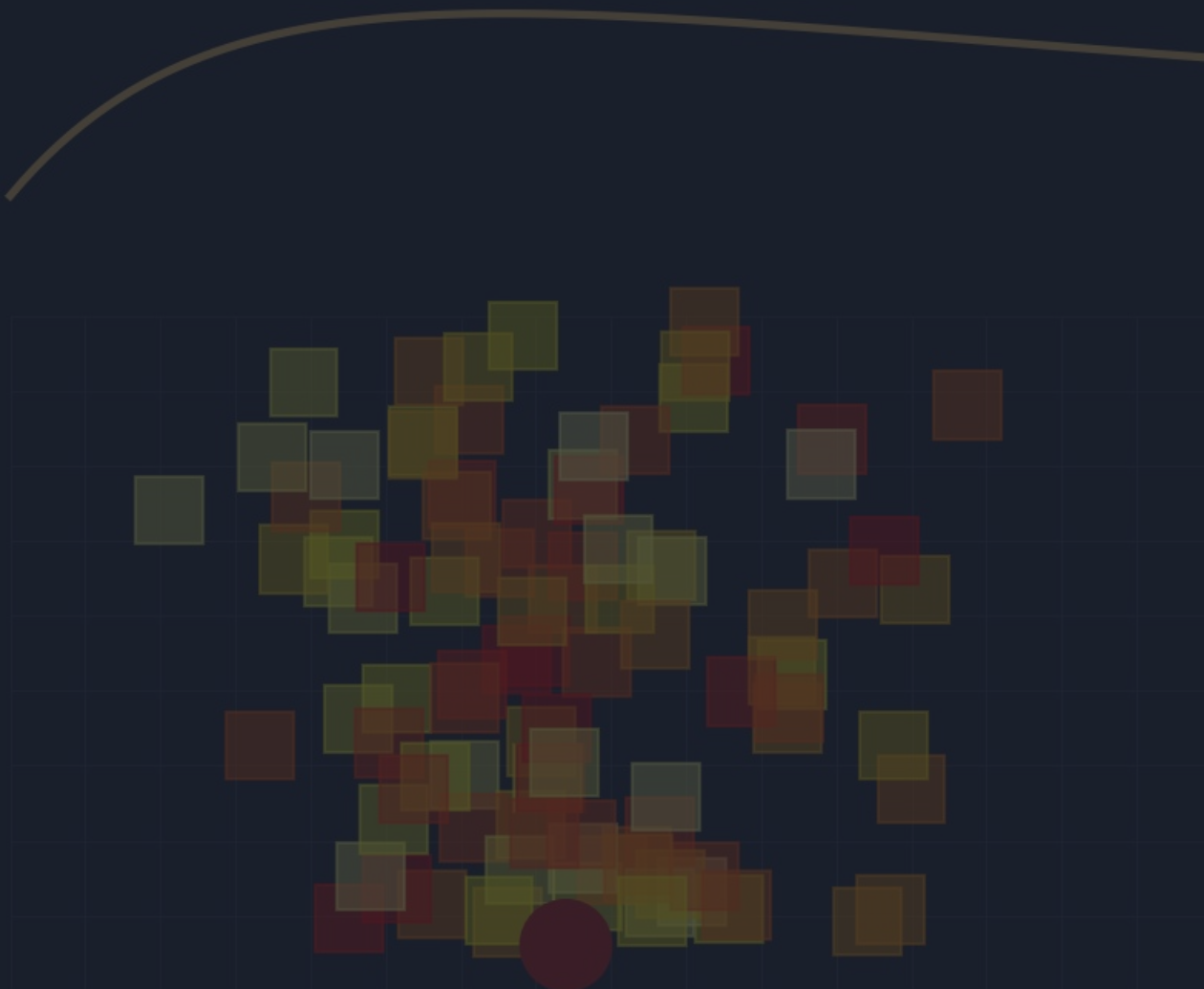
La progettazione prestazionale

Fire Safety Engineering

*La Sezione M del Codice: dimostrare la sicurezza con
l'ingegneria*

Scenari di progetto • curve HRR
modelli a zona e CFD • ASET > RSET
criteri di accettazione

$T(t)$



Indice della lezione

Dal metodo prescrittivo alla dimostrazione ingegneristica della sicurezza

PARTE I • PERCHÉ E QUANDO | IL METODO

1. Prescrittivo vs prestazionale
2. Cos'è la FSE e quando si usa
3. La Sezione M: M.1 • M.2 • M.3
4. Il processo in 4 fasi
5. Obiettivi e soglie di prestazione
6. M.2 — gli scenari di incendio di progetto
7. La curva HRR di progetto (RHR)

PARTE II • MODELLI E VERIFICA | PRATICA

8. Le curve d'incendio (nominali e naturali)
9. Modelli: algebrici, a zona, CFD (FDS)
10. M.3 — salvaguardia vita: $ASET > RSET$
11. Calcolo di ASET e di RSET
12. Criteri di accettazione e margine
13. Esempio applicativo • 14. Software
15. Limiti e responsabilità • 16. Sintesi

OBIETTIVI FORMATIVI

Al termine lo studente sarà in grado di: distinguere approccio prescrittivo e prestazionale e sapere quando usare la FSE • descrivere il processo della Sezione M (obiettivi, scenari di progetto M.2, verifica M.3) • costruire una curva HRR di progetto e scegliere il modello di calcolo adeguato (algebrico, a zona, CFD) • applicare il criterio $ASET > RSET$ con i relativi criteri di accettazione, comprendendone limiti e responsabilità professionali.

1. Due approcci alla sicurezza antincendio

Rispettare regole predefinite, oppure dimostrare di raggiungere gli obiettivi

PRESCRITTIVO (RTO/RTV)

- Regole e tabelle predefinite
- Soluzioni conformi
- Conformità = sicurezza
- Rapido, ma rigido



PRESTAZIONALE (FSE - Sez. M)

- Obiettivi di sicurezza da dimostrare
- Scenari di incendio + modelli
- Si calcola il livello di sicurezza
- Flessibile, ma oneroso

Non sono alternativi: sono complementari

Il **metodo prescrittivo** (RTO/RTV, soluzioni conformi) è rapido e dà certezza: se rispetti le tabelle, sei a norma. Il **metodo prestazionale** (FSE) non impone soluzioni, ma fissa obiettivi di sicurezza e chiede di dimostrarne il raggiungimento con scenari e calcoli.

Nella pratica si combinano: gran parte del progetto segue le soluzioni conformi, e la FSE interviene dove queste non bastano o non si applicano — edifici complessi, geometrie particolari, deroghe, ottimizzazione delle misure.

2. Cos'è la FSE e quando si usa

L'ingegneria della sicurezza antincendio applicata al caso concreto

DEFINIZIONE

La Fire Safety Engineering applica principi scientifici e ingegneristici per valutare il livello di sicurezza antincendio di un'opera, prevedendo lo sviluppo dell'incendio e i suoi effetti su persone e strutture, e dimostrando che gli obiettivi di sicurezza sono soddisfatti.

QUANDO CONVIENE / È NECESSARIA

- Attività prive di RTV o con geometrie particolari
- Edifici complessi o di grande dimensione (atri, centri commerciali, stazioni)
- Richieste di deroga al metodo prescrittivo
- Ottimizzazione tecnico-economica delle misure
- Edifici storici dove le soluzioni standard sono inapplicabili

I due ambiti di applicazione (Codice)

Salvaguardia della vita (M.3): si verifica che gli occupanti possano esodare prima che le condizioni diventino incapacitanti (criterio $ASET > RSET$). **Salvaguardia dei beni e continuità:** si verifica che le strutture mantengano la capacità portante per il tempo richiesto (analisi termo-strutturale con curve naturali).

Riferimenti: D.M. 3/8/2015, Sezione M (Metodi) · ISO 23932 (FSE – principi) · ISO/TR 16738 (comportamento d'esodo) · UNI EN 1991-1-2 (azioni termiche sulle strutture) · Capitolo M con i tre metodi M.1, M.2, M.3.

3. La Sezione M del Codice

Tre capitoli che strutturano la progettazione prestazionale

M.
1

Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio

Imposta il processo: obiettivi, soglie di prestazione, individuazione e quantificazione degli scenari, scelta dei modelli, valutazione dei risultati.

M.
2

Scenari di incendio per la progettazione prestazionale

Definisce come selezionare gli scenari di incendio di progetto (i più gravosi ma credibili) e come costruire la curva di rilascio termico (HRR).

M.
3

Salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale

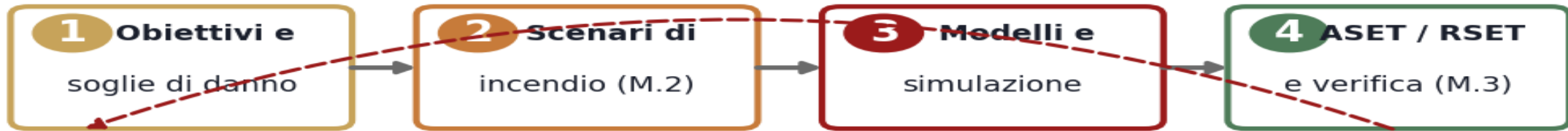
Stabilisce il criterio $A_{SET} > R_{SET}$, le soglie di danno per gli occupanti e la procedura di verifica dell'esodo.

La Sezione M è parte della RTO: si affianca alle Strategie (Sez. S) e alle RTV (Sez. V) ogni volta che si sceglie la via prestazionale.

4. Il processo della FSE in quattro fasi

Un percorso iterativo: si progetta, si verifica, si corregge

IL PROCESSO DELLA FIRE SAFETY ENGINEERING



se la verifica non è soddisfatta → si rivede il progetto (iterazione)

FASE 1 • OBIETTIVI

Si definiscono gli obiettivi di sicurezza e le soglie di danno (per persone e strutture).

FASE 2 • SCENARI

Si individuano gli scenari di incendio di progetto e si costruisce la curva HRR (M.2).

FASE 3 • MODELLI

Si simula l'incendio con il modello adeguato (algebrico, a zona o CFD).

FASE 4 • VERIFICA

Si confrontano i risultati con i criteri (ASET > RSET); se non ok, si itera (M.3).

5. Obiettivi e soglie di prestazione

Per dimostrare la sicurezza serve prima definire i limiti numerici

GLI OBIETTIVI DI SICUREZZA

- Il Codice fissa obiettivi primari:
- Salvaguardia della vita degli occupanti e dei soccorritori
 - Incolumità delle squadre di soccorso
 - Mantenimento della capacità portante in caso d'incendio
 - Limitazione della propagazione a opere vicine
 - Tutela dell'ambiente e dei beni
- La FSE li traduce in soglie numeriche verificabili.

Grandezza	Soglia di danno (tipica)
Visibilità	≥ 10 m (segnaletica/uscite)
Temperatura aria	≤ 60 °C (esposizione prolungata)
Irraggiamento	≤ 2,5 kW/m ² sugli occupanti
CO (monossido)	soglie su dose/esposizione (FED)
Altezza strato libero da fumo	≥ altezza di riferimento del locale

Il concetto di FED (Fractional Effective Dose)

La tossicità non dipende solo dalla concentrazione istantanea, ma dalla **dose cumulata nel tempo**. La FED somma il contributo dei gas tossici (CO, HCN, CO₂, deplezione di O₂) lungo l'esodo: la condizione di incapacitazione si raggiunge quando FED = 1. È il parametro più rigoroso per definire l'ASET, perché tiene conto dell'esposizione reale dell'occupante mentre si muove verso l'uscita, non di un singolo valore di picco.

6. M.2 — Gli scenari di incendio di progetto

Non tutti gli incendi possibili, ma quelli gravosi e credibili

COSA SONO

Uno scenario di incendio di progetto è una descrizione idealizzata e quantificata di un possibile incendio: dove nasce, come cresce, quanto combustibile coinvolge, quale ventilazione ha, quali misure sono attive.

Il progettista ne seleziona un numero limitato ma rappresentativo dei casi più gravosi e ragionevolmente credibili.

COME SI SCELGONO (M.2)

- Si parte dall'analisi dei rischi dell'attività
- Si individuano i focolai possibili e la loro localizzazione
- Si considera lo stato delle misure (es. sprinkler attivi/non attivi → scenario di guasto)
- Si scelgono gli scenari peggiori credibili (worst credible case)
- Si escludono gli eventi non credibili o catastrofici non governabili

I parametri che definiscono uno scenario

Innesco e localizzazione

Dove nasce l'incendio e in quale compartimento.

Combustibile e carico

Tipo, quantità, disposizione, carico d'incendio.

Velocità di crescita (α)

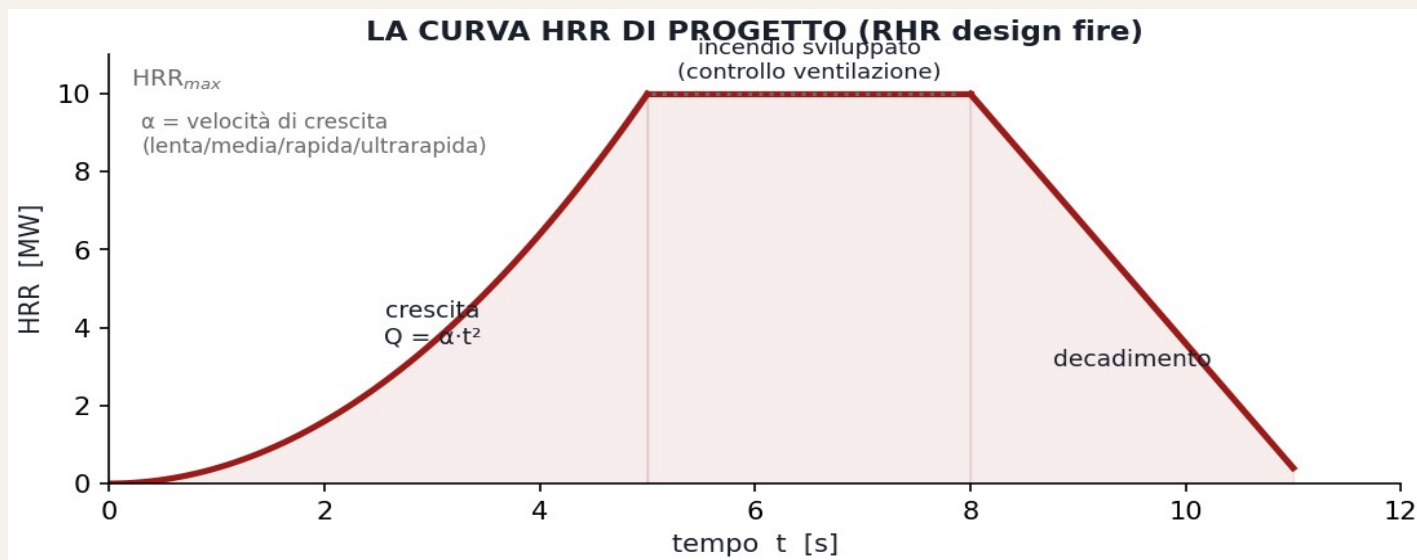
Lenta, media, rapida, ultra-rapida (curva t^2).

Ventilazione

Aperture, condizioni controllo combustibile/ventilazione.

7. La curva HRR di progetto (RHR)

Il cuore quantitativo dello scenario: quanta potenza termica, nel tempo



LE TRE FASI

- Crescita: $\dot{Q} = \alpha \cdot t^2$ (la potenza cresce col quadrato del tempo)
- Incendio sviluppato: plateau a HRR_{max} , spesso limitato dalla ventilazione
- Decadimento: esaurimento del combustibile

α (velocità di crescita) si sceglie tra lenta, media, rapida, ultra-rapida secondo il tipo di attività.

Perché l'HRR è il parametro decisivo

L'HRR (Heat Release Rate, potenza termica rilasciata) è l'input fondamentale di ogni simulazione: governa temperatura, produzione di fumo e velocità di propagazione. **I valori scelti per costruire la curva vanno sempre giustificati**, perché condizionano in modo determinante i risultati. La crescita t^2 (NFPA 72, EN 1991-1-2) è il riferimento più usato; HRR_{max} dipende dal combustibile e dalla ventilazione disponibile (un incendio può essere controllato dal combustibile o dalla ventilazione).

8. Le curve d'incendio: nominali e naturali

Due famiglie, due scopi diversi nella progettazione

CURVE NOMINALI (convenzionali)

Modelli standardizzati, riproducibili in laboratorio, della sola fase post-flashover:

- ISO 834 (standard, ambienti ordinari)
- Idrocarburi HC (combustibili liquidi, industria)
- Curva esterna (facciate)

Servono per classificare la resistenza al fuoco (REI) — sono prescrittive, sempre crescenti, senza raffreddamento.

CURVE NATURALI (parametriche)

Descrivono l'incendio reale dello specifico compartimento (EN 1991-1-2), in funzione di:

- carico d'incendio
- superficie e tipo di rivestimenti
- ventilazione (aperture)

Includono la fase di raffreddamento. Sono il riferimento della FSE: rappresentano ciò che accade davvero, non un test convenzionale.

La differenza che conta in progettazione

La curva ISO 834 cresce all'infinito: usarla per verificare una struttura significa assumere che l'incendio non si spenga mai — ipotesi prudente ma spesso irrealistica e costosa. **La curva naturale** include la fase di decadimento: una struttura che “collasserebbe” sotto ISO 834 può invece resistere a un incendio reale che si esaurisce. È qui che la FSE permette di ottimizzare — dimostrando con il calcolo ciò che la tabella non può cogliere.

Formula curva idrocarburi: $T(t) = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{(-0,167t)} - 0,675 \cdot e^{(-2,5t)}) + 20$

9. I modelli di calcolo dell'incendio

Dalla formula a mano alla fluidodinamica computazionale

MODELLI ALGEBRICI

Formule semplici (correlazioni sperimentali): altezza fiamma, temperatura del pennacchio, irraggiamento.

Veloci, per stime preliminari o casi semplici.

Es. correlazioni di Heskestad, Alpert.

MODELLI A ZONA

Il compartimento è diviso in 2 strati: uno caldo superiore (fumi) e uno freddo inferiore.

Buon compromesso per locali singoli di geometria regolare.

Es. CFAST, OZone, B-RISK.

MODELLI DI CAMPO (CFD)

Il volume è diviso in milioni di celle: si risolvono le equazioni del moto dei fluidi (Navier-Stokes).

Massimo dettaglio, geometrie complesse; oneroso in tempo e competenze.

Es. FDS (Fire Dynamics Simulator).

La regola: il modello più semplice che risponde alla domanda

Non serve sempre la CFD: usare FDS per un locale rettangolare è spesso sovradimensionato. Il progettista sceglie il modello in base alla complessità geometrica, al livello di dettaglio richiesto e alle risorse — e ne giustifica l'adequatezza. Per l'esodo si usano modelli dedicati (Pathfinder, FDS+Evac, Simulex).

CAPITOLO M.3

Salvaguardia della vita

Il criterio prestazionale $ASET > RSET$

Dimostrare che gli occupanti escono prima delle condizioni incapacitanti

10. M.3 — Il criterio $ASET > RSET$

Il confronto tra due tempi è il fondamento della verifica d'esodo

VERIFICA PRESTAZIONALE



✓ $ASET > RSET$
progetto sicuro

LA CONDIZIONE

$ASET > RSET$ deve valere SEMPRE.

ASET = tempo disponibile prima che l'ambiente diventi incapacitante.

RSET = tempo necessario perché tutti raggiungano un luogo sicuro.

La differenza è il margine di sicurezza, che assorbe le incertezze del modello.

Se $ASET < RSET$, si interviene su:

Aumentare ASET → controllo fumi (EFC), compartimentazione, riduzione del carico d'incendio, sprinkler.

Ridurre RSET → rivelazione più rapida ($\downarrow T_d$), allarme e GSA efficaci ($\downarrow T_r$), vie d'esodo più larghe o più brevi ($\downarrow T_m$).

DUE LEVE, UN OBIETTIVO

La sicurezza dell'esodo non è una proprietà fissa dell'edificio: è il risultato dell'equilibrio tra quanto velocemente l'ambiente degrada (ASET) e quanto velocemente le persone escono (RSET). Il progettista agisce su entrambe.

11. Come si calcolano ASET e RSET

Due percorsi di calcolo distinti che convergono nel confronto finale

ASET — tempo disponibile

Si ottiene simulando l'incendio (modello a zona o CFD) e individuando l'istante in cui una grandezza supera la soglia di danno:

- visibilità < 10 m
- temperatura > ~60 °C
- irraggiamento > 2,5 kW/m²
- FED (dose tossica cumulata) = 1

ASET è il minimo tra i tempi di superamento. Riferimenti: ISO/TR 16738, FDS.

RSET = Td + Tr + Tm

- Td — rilevazione: dipende dagli impianti (S.7), tipicamente secondi/minuti
- Tr — reazione: percezione e decisione (uffici 0,5-2', commerciale 1-3', pubblico fino a 5')
- Tm — movimento: da lunghezze, larghezze e velocità (0,8-1,2 m/s); calcolato con software d'esodo

Riferimenti: ISO/TR 16738; software Pathfinder, FDS+Evac, Simulex.

La procedura M.3 in quattro passi

1. Raccolta dati e definizione dello scenario d'incendio.
2. Calcolo di ASET (simulazione → condizioni critiche).
3. Calcolo di RSET (Td + Tr + Tm con modelli d'esodo).
4. Confronto finale ASET > RSET; se non soddisfatto, si modifica il progetto e si itera.

12. Criteri di accettazione e margine di sicurezza

Quando un progetto prestazionale si può dire “verificato”

IL MARGINE DI SICUREZZA

Non basta ASET appena maggiore di RSET: serve un margine che copra le incertezze dei modelli, dei dati di input e del comportamento umano.

Il margine si esprime come differenza ($ASET - RSET$) o come fattore. Maggiori sono le incertezze e la vulnerabilità degli occupanti, maggiore deve essere il margine richiesto.

ANALISI DI SENSIBILITÀ

Poiché i risultati dipendono dalle ipotesi (HRR, α , ventilazione, tempi di reazione), si fanno variare i parametri-chiave e si verifica che la conclusione resti valida.

È il modo per dimostrare che il progetto è robusto e non “tarato” su un'unica ipotesi favorevole. Spesso si analizzano più scenari (incluso il caso di guasto degli impianti).

Cosa significa “dimostrare la sicurezza”

Un progetto prestazionale è accettabile quando, per **tutti gli scenari di progetto credibili**, risulta $ASET > RSET$ con un margine adeguato, e quando l'analisi di sensibilità conferma la robustezza del risultato. La dimostrazione si formalizza in una **relazione tecnica** che documenta obiettivi, scenari, modelli, dati di input, risultati e conclusioni — sottoposta al giudizio del Comando VVF. La responsabilità della scelta e della giustificazione delle ipotesi è del professionista antincendio.

13. Esempio applicativo: un atrio commerciale

Come la FSE risolve un caso che il metodo prescrittivo non governa

IL PROBLEMA

Grande atrio a tripla altezza in un centro commerciale: le lunghezze d'esodo e le compartimentazioni standard (RTV) non sono applicabili alla geometria aperta. Si sceglie la via prestazionale per dimostrare la sicurezza dell'esodo.

LO SCENARIO DI PROGETTO

Incendio di un chiosco al piano terra, crescita rapida (α "fast"), HRR_max limitato dal combustibile presente; impianto di controllo fumi a soffitto attivo; scenario di guasto (EFC non attivo) analizzato a parte.

ASET (CFD)

Simulazione FDS: lo strato di fumo scende sotto la quota critica a $t \approx 8'$.

RSET (esodo)

Pathfinder: ultimo occupante in luogo sicuro a $t \approx 5'$.

VERIFICA

$8' > 5' \rightarrow$ margine 3': ASET > RSET soddisfatto.

SENSIBILITÀ

Variando α e T_r la conclusione regge $\rightarrow$ progetto robusto.

Il risultato: la FSE consente la geometria aperta desiderata dall'architettura mantenendo la sicurezza, dimostrandola con il calcolo invece di imporre compartimentazioni che snaturerebbero lo spazio. È l'essenza del metodo prestazionale: **non meno sicurezza, ma sicurezza dimostrata.**

14. Strumenti e software della FSE

Gli strumenti di calcolo più diffusi nella pratica professionale

Strumento	Tipo	Uso principale
FDS (Fire Dynamics Simulator)	CFD di campo	Simulazione incendio e fumi 3D
Smokeview	Visualizzatore	Post-processing dei risultati FDS
CFAST / OZone / B-RISK	Modello a zona	Locali singoli, stime rapide
Pathfinder / Simulex	Modello d'esodo	Calcolo di RSET (movimento persone)
FDS+Evac	Esodo accoppiato	Esodo con effetti del fumo
SAFIR / OZone	Termo-strutturale	Resistenza al fuoco con curve naturali

Lo strumento non sostituisce il giudizio

FDS, sviluppato dal NIST, è lo standard de facto per la simulazione di incendio ed è gratuito e open-source. Ma un software produce risultati validi solo se gli input (HRR, mesh, condizioni al contorno) sono corretti e giustificati: “garbage in, garbage out”. La competenza del progettista nel definire scenari e ipotesi resta il fattore decisivo.

15. Limiti, incertezze e responsabilità

La FSE è potente ma esige rigore e consapevolezza

INCERTEZZA DEI MODELLI

Ogni modello è un'approssimazione: i risultati hanno bande di incertezza che vanno dichiarate e coperte con il margine.

QUALITÀ DEGLI INPUT

HRR, velocità di crescita, tempi di reazione: ipotesi sbagliate invalidano tutto. Vanno giustificate e documentate.

COMPORTAMENTO UMANO

La reazione delle persone (pre-movimento, scelta dell'uscita) è la variabile più difficile da prevedere.

RESPONSABILITÀ PROFESSIONALE

Il progettista firma le ipotesi e i risultati. Servono competenza specifica, validazione e confronto col Comando VVF.

Prescrittivo e prestazionale: non rivali, ma strumenti

La FSE non è “una scorciatoia per fare meno”: è un modo per fare meglio dove le regole standard non bastano. Richiede più lavoro, più competenza e più responsabilità del metodo prescrittivo. **Il bravo progettista** sa quando il metodo prescrittivo è sufficiente (la maggior parte dei casi) e quando vale la pena passare al prestazionale — e in quel caso lo applica con rigore scientifico, trasparenza delle ipotesi e dialogo con l'autorità di controllo.

16. Riepilogo • i messaggi chiave

Sette concetti da portare con sé

1

Prescrittivo = rispettare regole; prestazionale = dimostrare gli obiettivi.

3

Il processo: obiettivi → scenari (M.2) → modelli → verifica (M.3), iterativo.

5

Curve naturali (con raffreddamento) ≠ curve nominali (solo classificazione).

2

La FSE (Sez. M) si usa dove le RTO/RTV non bastano o per deroghe/ottimizzazione.

4

L'HRR di progetto ($\dot{Q} = \alpha \cdot t^2$) è l'input che governa tutta la simulazione.

6

Modelli: algebrici, a zona, CFD — si sceglie il più semplice adeguato.

Il corso, ora completo

Lez. 1–2 combustione e materiali

Lez. 3 sistema normativo

Lez. 4 fenomeni industriali e rischio

Lez. 5–6 le 10 strategie (S.1–S.10)

Lez. 7 (questa) progettazione prestazionale (FSE).

Dalla fisica del fuoco alla dimostrazione ingegneristica della sicurezza.

AUTOVALUTAZIONE

1. Quando conviene la via prestazionale?
2. Cosa contengono M.1, M.2 e M.3?
3. Come si costruisce la curva HRR di progetto?
4. Differenza tra modello a zona e CFD.
5. Cos'è la FED e perché conta per l'ASET?

Riferimenti normativi e tecnici

Le fonti della progettazione prestazionale

NORMATIVA E CODICE

- D.M. 3 agosto 2015 — Codice di Prevenzione Incendi, Sezione M (Metodi)
 - M.1 Metodologia FSE
 - M.2 Scenari di incendio di progetto
 - M.3 Salvaguardia della vita (ASET/RSET)
- UNI EN 1991-1-2 — azioni sulle strutture esposte al fuoco (curve naturali)
- Eurocodici al fuoco (EN 1992/1993/1994-1-2)
- UNI 9502/9503/9504 — calcolo resistenza al fuoco

NORME INTERNAZIONALI E MODELLI

- ISO 23932 — Fire Safety Engineering, principi generali
- ISO/TR 16738 — comportamento d'esodo degli occupanti
- ISO 16730 / 16733 — valutazione dei modelli e scelta scenari
- NFPA 92 — controllo fumi; NFPA 72 — curve t^2
- SFPE Handbook of Fire Protection Engineering
- FDS Technical Reference Guide (NIST)

Modelli citati: FDS, CFAST, OZone, SAFIR, Pathfinder, FDS+Evac.

Prescrittivo o prestazionale: come decidere

Una mappa decisionale per il progettista

ESISTE UNA RTV E SI APPLICA?

Sì, e la geometria è ordinaria → segui il metodo prescrittivo (RTO + RTV). È più rapido e dà certezza.

GEOMETRIA O USO PARTICOLARE?

Atri, grandi volumi, edifici storici, layout non standard → valuta la via prestazionale (FSE).

SERVE UNA DEROGA?

Le soluzioni conformi non sono applicabili o sostenibili → la FSE dimostra l'equivalenza di sicurezza.

VUOI OTTIMIZZARE?

Ridurre costi mantenendo la sicurezza → la FSE quantifica e giustifica soluzioni alternative.

La sintesi del modulo

Abbiamo percorso l'intera filiera: la fisica del fuoco (Lez. 1-2), le regole (Lez. 3), i fenomeni industriali e il rischio (Lez. 4), le dieci strategie (Lez. 5-6) e infine il metodo che le mette in gioco quantitativamente (Lez. 7). **Il prescrittivo dà le risposte pronte; il prestazionale dà gli strumenti per costruirle quando le risposte pronte non ci sono.** Saperli usare entrambi, scegliendo consapevolmente, è ciò che distingue il progettista antincendio competente.



UNA RIFLESSIONE FINALE

« La regola dice cosa fare.
L'ingegneria spiega perché funziona. *Progettare la
sicurezza*
è saper passare dall'una all'altra. »

Lezione 7 · La progettazione prestazionale (FSE, Sezione M)