

PIANIFICAZIONE DELLA SICUREZZA ANTINCENDIO NEGLI ASILI NIDO: “SCENARI D’INCENDIO PER LA GESTIONE DELL’ESODO IN EMERGENZA”

M. Lombardi¹, G. Rossi², N. Sciarretta³, L. Grossi⁴

¹Università degli Studi di Roma, Sapienza – mara.lombardi@uniroma1.it

²Università degli Studi di Roma, Sapienza – giuliano.rossi@uniroma1.it

³Università degli Studi di Roma, Sapienza – nicolo.sciarretta@uniroma1.it

⁴Università degli Studi di Roma, Sapienza – luca.grossi@uniroma1.it

SOMMARIO

Lo scopo della sicurezza antincendio nelle strutture finalizzate all’attività di asili nido, con riferimento all’incolumità dei bambini, soggetti particolarmente bisognosi di protezione attiva, rende opportuno un esame puntuale del quadro tecnico normativo, al fine di verificare l’efficacia dei requisiti minimi richiesti e garantire il non superamento dei livelli di accettabilità.

Allo stato attuale, l’allegato I al D.P.R. 1 agosto 2011 n. 151 [1] colloca tra le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi anche gli asili nido; pertanto, l’attività n° 67 (ex 85) amplia il campo di applicazione dalle *scuole di ogni ordine, grado e tipo, collegi, accademie con oltre 100 persone presenti agli Asili nido con oltre 30 persone presenti*.

Fino all’emanazione della regola tecnica di progettazione, costruzione ed esercizio degli asili nido (D.M. 16/07/2014) [2], per la suddetta attività si sono adottati i metodo e criteri ingegneristici della sicurezza antincendio proposti dalle linee guida dalla direzione regionale del Friuli Venezia Giulia o dal comando provinciale di Palermo.

La normativa vigente, risolve formalmente il problema dell’adeguamento legislativo, introducendo l’osservanza della norma tecnica verticale anche per gli asili nido, ma tale provvedimento di fatto non risolve né le condizioni di criticità derivanti dalle caratteristiche psicofisiche degli utenti, né le condizioni di criticità strutturali ed organizzative che edifici storici o ubicati in ambiti urbanistici di particolari specificità possono presentare.

Tale deficit può essere superato adottando il Decreto Ministeriale 9 maggio 2007 "direttive per l’attuazione dell’approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio" nell’ambito dei procedimenti di prevenzione incendi [3].

In questo articolo viene proposto, nell’ambito della *fire safety engineering*, un criterio di modellazione del fire design per la determinazione dei parametri termo-fluidodinamici rilevanti per la sicurezza degli esposti in asili nido ed il confronto con le rispettive curva di incendio naturale e nominali di più frequente utilizzo.

I fattori determinanti nella difesa dagli incendi in queste attività sono influenzati pesantemente dalle peculiarità che contraddistinguono gli utenti: bambini tra 0 e 3 anni di età, non autosufficienti e bisognosi di assistenza in condizioni ordinarie e ancor più in caso di emergenza.

Gli strumenti di modellazione adottati per la simulazioni sono FDS 5 e Smokeview 5.4.8 prodotti dal National Institute of Standards and Technology (NIST) [4], [5].

Il volume di studio analizzato risulta circoscritto al solo spazio della sala multiattività ed è stato simulato per una durata del fenomeno non superiore ai 15 minuti dopo l’innesco, in considerazione del fatto che la valutazione del flusso di pericolo verso gli esposti è rilevante solo in questa prima fase nella quale viene attivato l’autosoccorso.

Sono stati costruiti in FDS tre ambienti con arredo tipico presente in asilo nido [6], differenziati per dimensioni geometriche, aperture di ventilazione e quantitativo di materiale combustibile.

Per ognuno dei tre ambienti è stata prevista una duplice simulazione; in un caso, i parametri d’incendio sono stati ricavati dalla simulazione caratterizzata dalla funzione HRR analitica, mentre

nell'altro caso la funzione HRR è stata ricavata a posteriori, procedendo ad una simulazione di incendio naturale nel locale realisticamente arredato, condizionata dall'innesco minimo efficace. Dall'andamento delle curve HRR simulate, opportunamente linearizzate, sono state quindi ricavate tre Curve di Incendio Verosimili (CIV).

Il confronto tra i parametri d'incendio ha riguardato le curve di rilascio termico [kW-t] costruite sulla base dei risultati delle tre differenti simulazioni esaminate e le corrispondenti curve d'incendio analitiche che costituiscono il riferimento normativo nell'ambito dell'ingegneria antincendio.

Le curve naturali di più consolidato utilizzo sono state introdotte allo scopo di procedere alla verifica della *resistenza strutturale*: l'adozione di questi modelli nell'ambito della ingegneria antincendio finalizzata alla *sicurezza degli esposti* è avvenuta per analogia, nell'assunto che i fenomeni di intensità rilevante che queste rappresentano garantiscano un'implicita cautela nella scelta del fire design.

Lo studio evidenzia invece che la curva analitica, la cui adozione è adatta allo scopo di verificare la resistenza strutturale, genera campi di temperature e di concentrazioni tossiche inferiori a quelli ottenuti con la simulazione completa dell'incendio naturale nelle fasi di innesco e crescita, cioè nelle fasi temporali che richiedono l'attivazione dell'autosoccorso e la gestione dell'esodo.

Questo risultato dimostra che l'assunzione del criterio di verifica implicitamente contenuto nelle curve di incendio analitiche non presenta il carattere di cautela che un criterio uniformato dovrebbe contenere.

Tale considerazione indica l'opportunità di adottare i modelli di fluido dinamica computazionale allo scopo di dimensionare la curva d'incendio rappresentativa del modello di sollecitazione in esame (HRR_{CIV}); l'adozione del suddetto modello per l'analisi termo-fluido dinamica e d'esodo estesa all'intera struttura garantisce una maggiore verosimiglianza degli scenari d'incendio scelti per la valutazione di sicurezza degli esposti, che nel caso specifico sono risultati più gravosi.

Poter disporre di modelli termo-chimici ad hoc per le diverse attività soggette ai controlli di prevenzione incendi rappresenta il punto di partenza per progettare il complesso di misure gestionali e di protezione idonee al raggiungimento del luogo sicuro in tempi compatibili con il superamento dei livelli di letalità nella struttura causati dall'incendio. Questo concetto viene riassunto con la formula $ASET > RSET$ [7]; la combinazione tra sollecitazione termica e concentrazione dei gas tossici rappresenta l'elemento che maggiormente condiziona il tempo disponibile all'esodo.

1. INTRODUZIONE

L'incremento della capacità di calcolo dei computer degli ultimi anni ha permesso l'adozione di software simulativi anche nell'ambito della progettazione antincendio, consentendo lo sviluppo del filone di ricerca e di applicazione professionale innovativo, meglio noto come *fire safety engineering* [8].

L'idea che gli incendi possano essere studiati numericamente è stata probabilmente concepita all'inizio dell'era dei computer, anche se le equazioni fondamentali della fluidodinamica, del trasporto termico e della combustione, che sono alla base degli attuali più complessi modelli, sono state elaborate oltre un secolo fa.

In particolare il modello di "campo" rappresenta oggi lo strumento di modellazione di punta dell'ingegneria antincendio; la risoluzione per via numerica delle equazioni di Navier-Stokes fornisce la stima dell'evoluzione dell'incendio in un qualsiasi volume di calcolo assegnato.

Lo strumento di modellazione adottato per la simulazione dell'evoluzione dell'incendio è FDS 5, mentre, è stato utilizzato per la visualizzazione del fenomeno il post-processore Smokeview 5.4.8; entrambi sono distribuiti dal National Institute of Standards and Technology (NIST).

FDS (Fire Dynamic Simulator) è stato sviluppato dalla Fire Research Division - Building and Fire Research Laboratory (BFRL) del National Institute of Standards and Technology (NIST), che in oltre 25 anni di test di validazione a differenti scale è stato adattato prioritariamente alla risoluzione di scenari d'incendio [9].

I risultati prodotti dal solutore vengono generalmente riportati in file di testo e possono essere visualizzati e/o elaborati grazie al post-processore Smokeview, che consente di visualizzare la geometria del dominio di integrazione, di rappresentare graficamente i campi vettoriali e scalari, nel

caso di simulazioni in transitorio, permettere di eseguire animazioni filmate che illustrino l'evoluzione dinamica delle grandezze di interesse.

Una difficoltà intrinsecamente associata alle simulazioni di esodo è sempre stata quella del disaccoppiamento fra i dati relativi all'incendio e quelli relativi all'esodo degli occupanti l'edificio.

I ricercatori Timo Korhonen e Simo Hostikka del VTT Finlandese svilupparono il loro software di simulazione di evacuazione utilizzando le potenzialità di FDS per il calcolo dei flussi di esodo, realizzando il pacchetto FDS + Evac che permette il calcolo degli effetti dell'incendio simultaneamente al processo di evacuazione degli agents dal dominio simulato [10].

Parallelamente allo sviluppo dei software di fluido dinamica computazionale (CFD) la normativa tecnica antincendio internazionale ha subito una forte evoluzione: negli ultimi 20 anni il mondo della ricerca di settore ed i professionisti dell'antincendio hanno vissuto il rapido passaggio dall'ingegneria di tipo prescrittivo ad un modello d'ingegneria basata sulla prestazione [3] [8].

Adottando tale approccio di progettazione, l'ingegnere fissa gli obiettivi di progetto, verifica le caratteristiche specifiche dell'attività e analizza singolarmente le peculiarità dell'opera. Il confronto oggettivo dei risultati con gli obiettivi inizialmente fissati restituisce concordanza/discordanza d'esito. In questo modo si lascia al professionista, attraverso l'utilizzo di tecniche simulate, la responsabilità della verifica della prestazione antincendio attesa in termini di resistenza della struttura e/o di salvabilità degli esposti.

Il livello di conoscenza nell'ambito del fire design e le pubblicazioni dei più noti centri di ricerca nel settore dimostrano che le tecniche simulate disponibili e validate per la modellazione degli incendi rispondono positivamente alle aspettative, sia pure con onere computazionale molto elevato, ma con i vantaggi di:

1. studiare il comportamento di un sistema complesso partendo dalle caratteristiche di reazione al fuoco di componenti elementari;
2. offrire soluzioni a problemi non affrontabili in altro modo, neanche attraverso la sperimentazione diretta;
3. ridurre costi e tempi rispetto alle prove sperimentali.

Con riferimento ai vantaggi sopracitati ed in considerazione della forte componente stocastica intrinseca ai fenomeni d'incendio e di gestione dell'emergenza, risulta ormai chiaro che l'idea di gestire il problema della sicurezza delle persone in un edificio effettuando semplicemente esercitazioni periodiche d'esodo [11], come anche definire il modello di sollecitazione termo-chimica effettuando solo prove sperimentali [12] su campioni limitati e "rappresentativi" è sicuramente necessario, ma non sufficiente allo scopo.

La possibilità di ricorrere a software di fluido dinamica computazionale nonché l'uso consapevole di questi modelli di simulazione consente di superare alcuni problemi quali: il costo delle molteplici prove sperimentali, la possibilità di implementazione del risultato di prova nel modello ed infine l'opportunità di poter replicare e scalare la simulazione infinite volte.

In conclusione, il processo prestazionale nonché l'analisi del livello di sicurezza si concretizzano nella valutazione qualitativa e quantitativa del rischio secondo le metodologie riconducibili ai criteri della Quantitative Risk Analysis ed alle valutazioni affidabilistiche derivanti dall'approccio RAMS. La metodologia di verifica prestazionale consolidata è basata sulle definizioni del complesso normativo degli Eurocodici. Il metodo di verifica si articola nei seguenti passi:

- definizione antincendio della struttura;
- selezione degli incendi di progetto;
- valutazione delle condizioni di salvabilità degli esposti;
- valutazione della resistenza al fuoco degli elementi strutturali.

La scelta dell'incendio di progetto può avvenire sulla base dell'utilizzo esperto di curve di incendio naturali o selezionando una curva di incendio nominale tra quelle disponibili nella letteratura scientifica e validate dall'assunzione nella normativa tecnica.

2. LAYOUT DI SIMULAZIONE

I tre ambienti oggetto della simulazione riproducono i tipici locali pluriattività degli asilo nido, come mostrato in foto.



Figura 1: esempio locale multi-attività [fonte: google immagini].

I locali, a pianta quadrata, presentano superfici e volumi differenti ma la quota all'intradosso risulta costante e pari a 3.2 [m]; anche lo spessore delle pareti non varia ed è di 0.2 [m].

Il calcolo è stato condotto considerando le superfici di ventilazione completamente aperte, in modo da garantire la disponibilità di comburente tale da determinare una combustione stechiometrica.

Il singolo locale è stato quindi arredato in modo conforme allo specifico utilizzo e sulla base delle informazioni reperite durante i sopralluoghi effettuati in una struttura reale.

Le superfici ed i volumi sono riferite alle dimensioni interne del locale.

	Stanza Piccola	Stanza Media	Stanza Grande
n° mesh da 5[cm]	405 000	1 036 800	1 620 000
* Superficie [m ²]	9.92 (3.15x3.15)	21.16 (4.60x4.60)	44.22 (6.65x6.65)
* Volume [m ³]	31.75	67.71	141.51
Porta [n°]	1	1	2
Finestra [n°]	1	2	4
Sup. Vent. [m ²]	1.8	3.6	7.2
% Sup. trasparente	18,1 %	17.01 %	16.28 %

Tabella 1: Caratteristiche geometriche dei locali simulati.

	Stanza Piccola	Stanza Media	Stanza Grande
Lettini in poliuretano [kg]	131,04	262,08	524,16
Tavolo in legno [Kg]	17,25	29,25	58,5
Sedie in legno [Kg]	6,774	13,548	27,096
Armadio in legno [Kg]	30	60	120
Struttura in legno per la tenda [Kg]	2,625	2,625	5,25
Tendaggi [Kg]	0,506	1,012	2,024
Risme di carta [Kg]	4,5	9	18
Poster in carta [Kg]	1,5	1,95	3,9
Bottiglie in plastica [Kg]	0,9375	1,875	3,75
Totale [Kg]	195,13	381,34	762,68

Tabella 2: Quantitativi di materiale d'arredo combustibile.

	Potere Calorifico Inferiore
Poliuretano [MJ/Kg]	41,86
Legno [MJ/Kg]	15,00
Tendaggi [MJ/Kg]	30,00
Carta [MJ/Kg]	14,00
Bottiglie in plastica [MJ/Kg]	25,00

Tabella 3: Poteri Calorifici per i materiali d'arredo.

3. CURVA D'INCENDIO ANALITICA

Il modello matematico adottato per la valutazione dei parametri fondamentali che caratterizzano le tre curve analitiche di rilascio termico è il metodo di Thomas [13] [14]. In base a tale modello, seppur con le dovute semplificazioni, la curva di incendio analitica viene elaborata sulla base delle condizioni d'incendio effettive, con riferimento al materiale combustibile e alle condizioni di ventilazione, che complessivamente determinano l'andamento nel tempo dei parametri caratteristici della combustione (innesco, crescita, fase di pieno sviluppo, decadimento).

Il carico d'incendio dovuto ai diversi materiali combustibili è stato calcolato attraverso la formula di seguito:

$$q_f = \sum_{i=1}^n g_i \cdot H_i \quad [\text{MJ}] \quad (1)$$

dove:

g_i = massa dell'i-esimo materiale combustibile [kg];

H_i = potere calorifico inferiore dell'i-esimo materiale combustibile [MJ/kg];

Il grafico che segue mostra le formule ed i parametri caratteristici per la determinazione della curva di rilascio termico secondo le indicazioni contenute nel metodo di Thomas [13] e nell'eurocodice UNI EN 1991-1-2 [15].

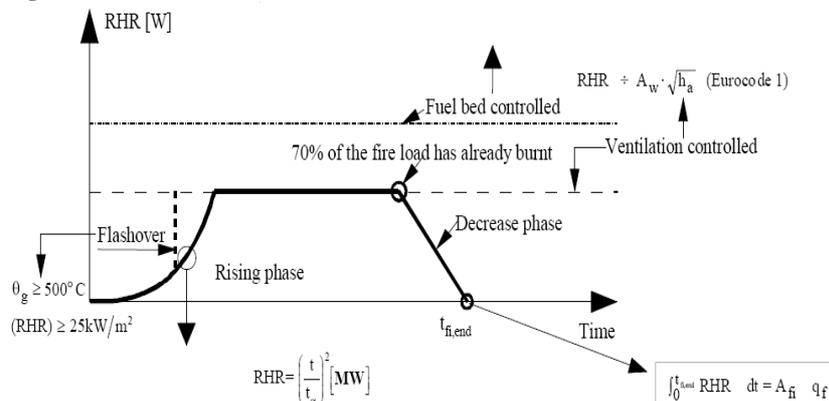


Grafico 1: Fire evolution, propagation, suppression (active measures) [16]

La curva di potenza termica [kW-t] per ambienti riconducibili ad attività scolastica presenta una fase d'ignizione caratterizzata dal fattore di crescita medio dell'incendio: $\alpha = 0.01111 \text{ [kJ/s}^3]$ [15] [17].

I dati caratteristici del fenomeno sono riassunti nella tabella 4, mentre nel grafico 2 vengono mostrati gli andamenti dell'HRR(t) caratterizzati dalle fasi d'ignizione e crescita, dalle fasi di pieno sviluppo che termina quando convenzionalmente è stato consumato il 70% del combustibile disponibile, e dalle fasi di decadimento.

	Stanza Piccola	Stanza Media	Stanza Grande
Carico d'incendio [MJ]	6 457,68	12 782,54	25 869,78
Fattore di Ventilazione	0,0359	0,0427	0,0498
$\text{HRR}_{\text{FLASHOVER}}$ [MW]	1,36	3,34	17,01
HRR_{MAX} [MW]	5,32	9,57	17,30
$t_{\text{FLASHOVER}}$ [s]	350,91	548,56	1237,39
$t_{\text{MAX(1)}}$ [s]	692,07	928,41	1248,04
$t_{\text{MAX(2)}}$ [s]	1310,81	1553,25	1866,08
t_{TOTALE} [s]	2038,87	2354,06	2752,37

Tabella 4: Parametri caratteristici per le tre condizioni di simulazione

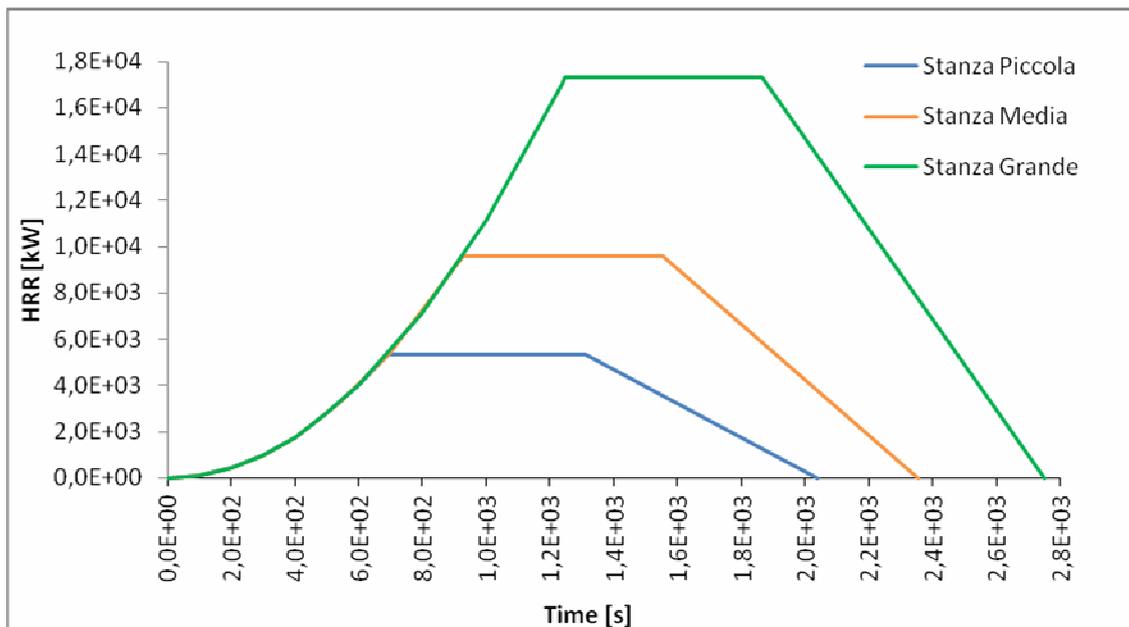


Grafico 2: Curva di rilascio termico HRR(t), metodo di Thomas.

La simulazione di incendio è stata sviluppata inserendo nel volume di calcolo un oggetto con la caratteristica termica del “burner” ed al quale è stata imposta la funzione HRR-t analitica precedentemente elaborata.

Gli andamenti della temperatura nel tempo ottenuti dalle simulazioni sono stati riportati nel grafico 3.

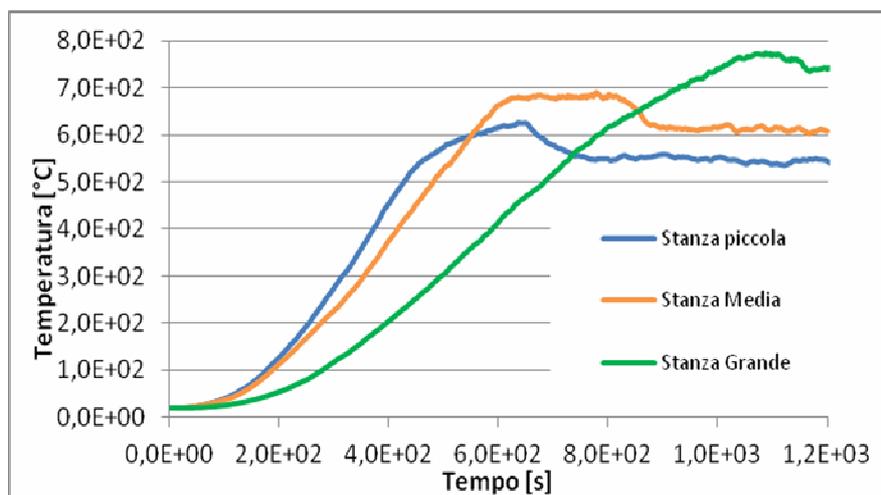


Grafico 3: Andamento delle curve Temperatura-Tempo per le tre condizioni di simulazione

Le tre curve sono state elaborate a partire dai dati ottenuti mediante un dispositivo di controllo della temperatura installato al soffitto in posizione baricentrica.

Le fasi di crescita presentano un andamento pseudolineare fino al raggiungimento della temperatura massima, ma dal confronto si evince che il coefficiente angolare si riduce all’aumentare della superficie del compartimento. Un aspetto interessante riguarda la fase a temperatura costante che invece si espande proporzionalmente all’aumentare sia della superficie che del quantitativo di materiale combustibile presente. La fase di raffreddamento, che non risulta graficizzata, chiude il fenomeno di rilascio termico. La simulazione è stata interrotta a 1200 s in considerazione del fatto che, la valutazione del flusso di pericolo verso gli esposti è rilevante principalmente nelle fasi iniziali coincidenti con l’esodo degli esposti.

4. CURVA D'INCENDIO VEROSIMILE

Con riferimento al § 2 e per la comparazione dei risultati l'ambiente di simulazione in FDS5 è stato riprodotto con lo stesso assetto geometrico e con le medesime condizioni al contorno adottati nella valutazione della curva analitica.

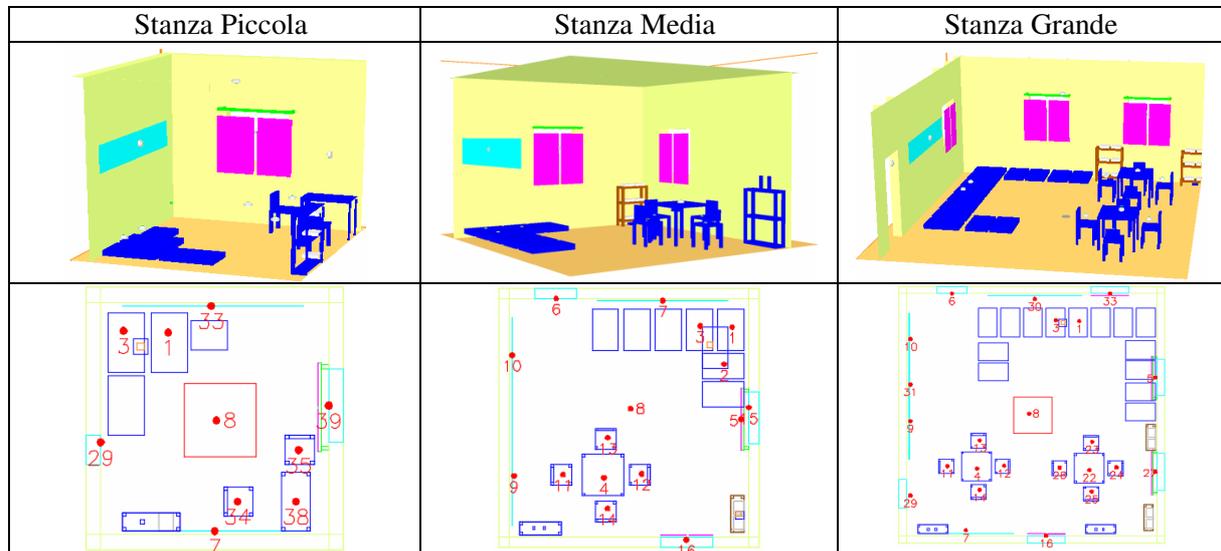


Tabella 5: Vista 3D (Smokeview) dell'allestimento dei locali simulati e planimetria illustrativa di geometria, aperture di ventilazione, arredi e sonde di misura.

L'innesco del materiale è stato ottenuto attraverso l'attivazione di una piastra radiante, situata al di sotto di uno dei lettini in poliuretano, caratterizzata da una temperatura minima efficace per l'ignizione. Lo scopo è quello di attivare un processo di combustione resistente senza che la piastra influisca sui parametri propri del fenomeno attivato, riproducendo così le condizioni di innesco naturale (come nel caso, ad esempio, di inneschi dovuti ad apparecchi elettrici cortocircuitati).

Le caratteristiche dell'innesco sono state ottenute attraverso una batteria di simulazioni dedicate per ricavare la temperatura minima di l'accensione del materiale adiacente, avendo imposto una superficie di piastra di 0.05 [m] x 0.05 [m] ed una durata di emissione termica persistente per un tempo pari a 150 s.

Dall'analisi descritta sono state ricavate le temperature minime efficaci per i tre ambienti di simulazione:

	Stanza Piccola	Stanza Media	Stanza Grande
Temp. Piastra [°C]	1425	1500	1742

Tabella 6: temperature minime efficaci nelle simulazioni delle curve d'incendio verosimile.

5. CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI DEL CURVA D'INCENDIO VEROSIMILE

La simulazione di incendio sviluppata nelle condizioni descritte ha restituito il seguente complesso di risultati:

1. la funzione HRR-t simulata (Grafico 4);
2. la funzione HRR-t linearizzata (Grafico 5);
3. l'andamento T-t nei locali di simulazione, misurato dai sensori disposti nel volume di studio (Grafico 6).

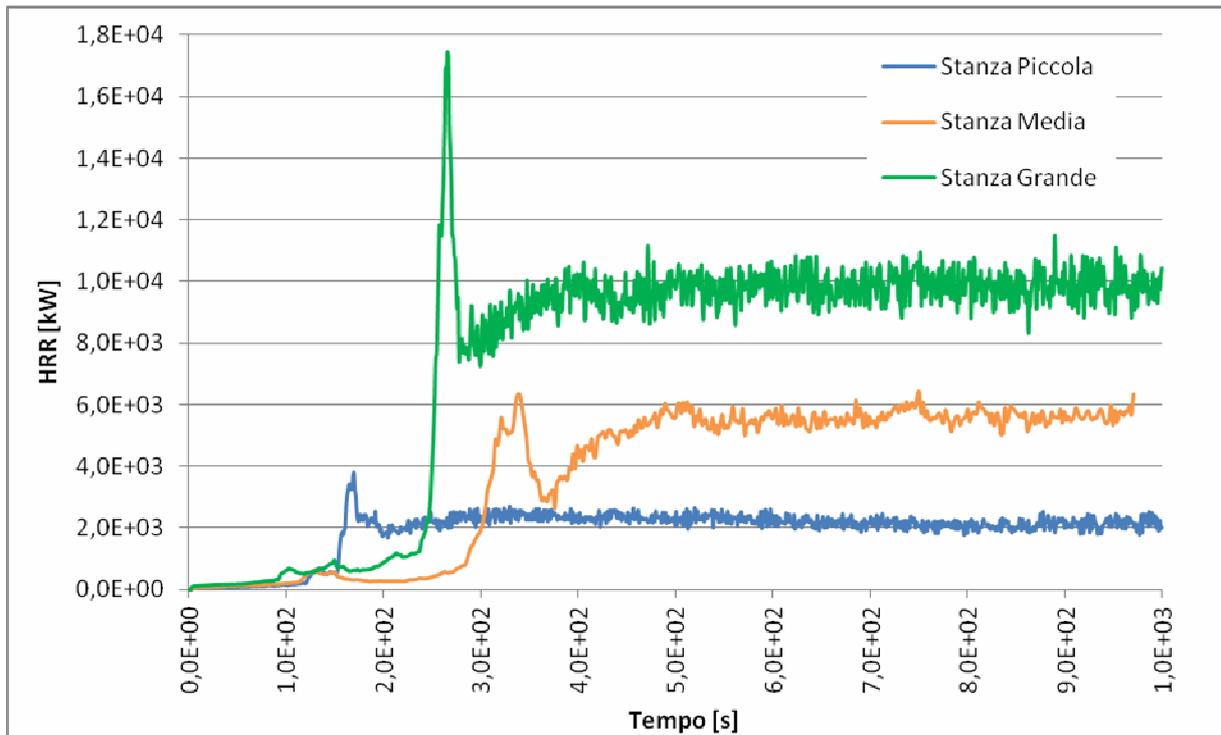


Grafico 4: curve HRR(t) Verosimili relative ai tre locali valutata attraverso la simulazione in FDS5.

L'andamento della funzione HRR_{CIV} evidenzia una corrispondenza interessante nei comportamenti dei materiali combustibili presenti nelle tre stanze multiattività simulate:

- la fase di innesco;
- la fase di sviluppo fino al raggiungimento del picco massimo di potenza;
- il raggiungimento del flashover
- un intervallo di decrescita-crescita dovuto sia all'estinzione del combustibile (costituito dal materassino inizialmente innescato) che al ritardo temporale legato all'inerzia termica degli altri arredi lambiti dal flusso termico generato proprio dal materassino incendiato;
- il raggiungimento del plateau di pieno sviluppo che si mantiene fino al termine della simulazione.

Dall'andamento della curva simulata di rilascio termico è stata ricavata una curva $HRR(t)$ linearizzata, utilizzabile come input nel solutore FDS – EVAC per la simulazione di struttura a larga scala. La funzione discretizzata così introdotta viene denominata Curva di Incendio Verosimile (CIV).

La Curva di Incendio Verosimile è, tratto per tratto, una funzione iso-integrale rispetto alla curva di incendio ottenuta dalla simulazione (Tabella 7; Grafico 5).

Stanza Piccola		Stanza Media		Stanza Grande	
s	kW	Tempo	HRR	s	kW
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
120,0	210,0	282,0	610,1	245,0	1425,0
154,0	734,0	338,0	6428,7	267,0	17225,0
168,0	3665,0	367,0	2375,0	276,0	9615,0
183,0	2219,0	446,8	5630,0	1000,0	9615,0
1000,0	2219,0	970,0	5630,0		

Tabella 7: Valori dei punti caratteristici della curva d'incendio CIV corrispondenti ai cambi di pendenza.

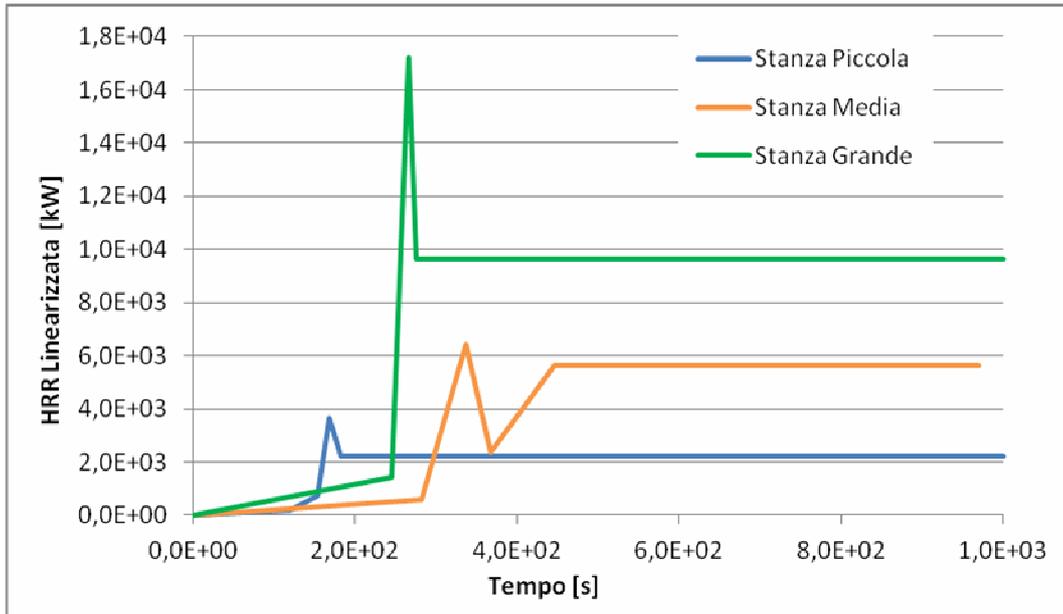


Grafico 5: Linearizzazione delle funzioni HRR(t) verosimili simulate in FDS5.

L'andamento delle temperature in ogni locale ha evidenziato che i valori massimi vengono coerentemente registrati al soffitto, in virtù del fatto che nella parte sommitale del dominio si concentrano direttamente i fumi caldi; le altre sonde registrano un significativo incremento di temperatura nel momento in cui gli oggetti combustibili nelle vicinanze si innescano per effetto del flash-over.

Le temperature massima registrate dalle sonde posta sul soffitto del locale si sono attestate tra i 500°C ed i 600°C, mentre tutte le altre hanno registrato temperature inferiori a quelle rilevate dalla termocoppia n°8 (cfr. Grafico 6).

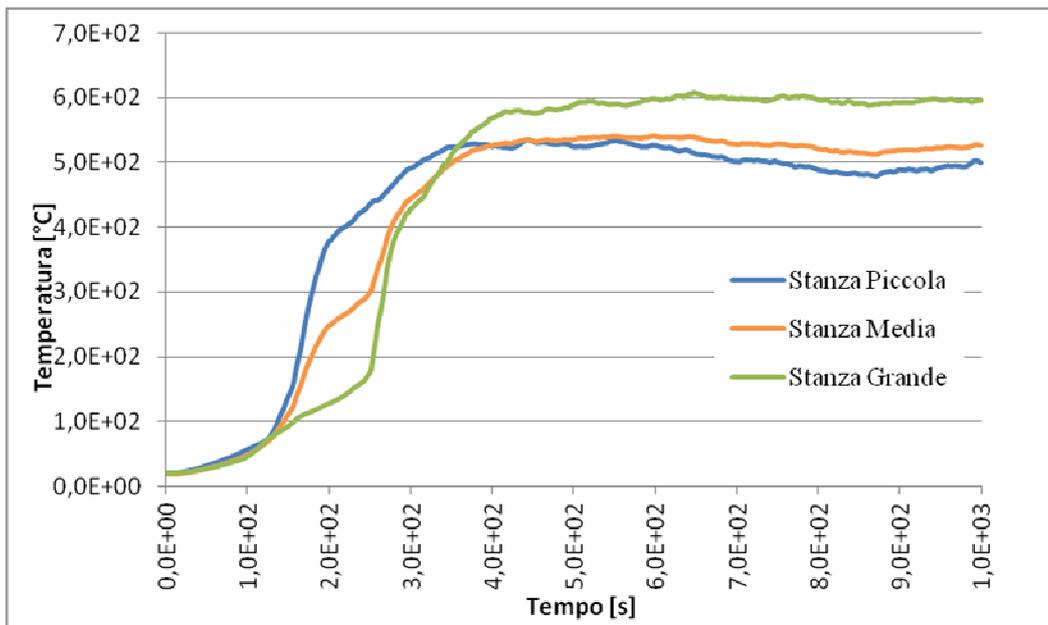


Grafico 6: Curve Temperatura – tempo simulate in FDS5 [elaborazione dei dati registrati dalla termocoppia n°

6. CONFRONTI E CONCLUSIONI: HRR_{CIV} vs $HRR_{Analitica}$

I risultati ottenuti nella curva d'incendio verosimile confortano circa la rappresentatività del caso analizzato: è risultato che le tre HRR_{CIV} presentano un coefficiente di crescita α maggiore rispetto a quanto indicato da Eurocodice EN 1991-1-2: Azioni in generale – Azioni sulle strutture esposte al fuoco – prospetto 4. Nell' allegato E del suddetto eurocodice si suggerisce, in caso di simulazioni di incendio con curva naturale in ambienti scolastici, l'adozione di un coefficiente di crescita medio pari a 300 secondi.

Le HRR_{CIV} ricavate dalle simulazioni presentano un tempo di ignizione t_g (tempo per il raggiungimento di 1MW) inferiore ai 300 sec imposti dalla normativa e pertanto l'assunzione di questo criterio di verifica rispecchia implicitamente il carattere di cautela atteso.

La tabella 8 ed il grafico 7 di seguito riportati riassumono la considerazione esposta.

α Eurocod 1 (Scuole)	Stanza Piccola	Stanza Media	Stanza Grande
0.01111 kJ/s ³	0.04162 kJ/s ³	0.01189 kJ/s ³	0.02379 kJ/s ³

Tabella 8: Coefficiente di crescita dell'incendio [α]

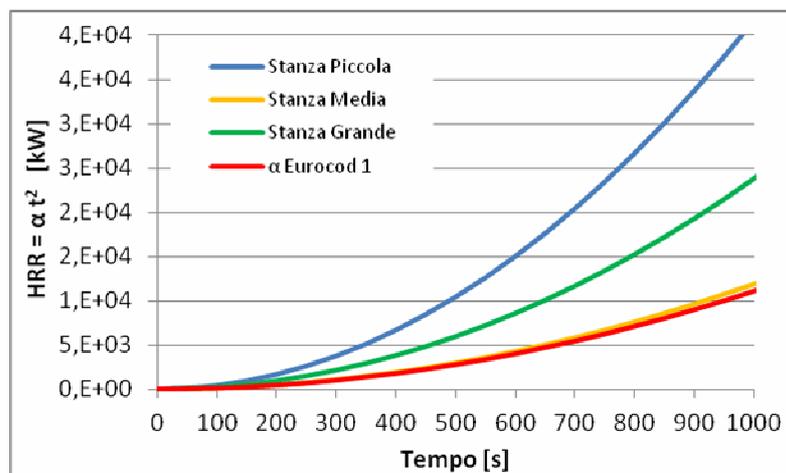


Grafico 7: Curve HRR – tempo simulate per le tre stanze e curva proposta ex Eurocod 1

Il confronto fra le HRR_{CIV} e le HRR_{Anal} riportato nella Tabella 9 evidenzia, oltre la fase di ignizione, uno scostamento significativo dell'andamento: la HRR_{Anal} , calcolata secondo il metodo di Thomas, presenta un valore di potenza termica massima più elevato, ma in un tempo maggiore rispetto alla HRR_{CIV} .

Stanza Piccola:	Stanza Media:	Stanza Grande:
$t_{intersezione} \approx 400$ s	$t_{intersezione} \approx 700$ s	$t_{intersezione} \approx 900$ s
$T_{uguaglianza} = 463,5$ s	$T_{uguaglianza} = 1049,0$ s	$T_{uguaglianza} = 1613,5$ s

Tabella 9: Confronto tra le curve d'incendio verosimile (HRR_{CIV}) e le corrispondenti curve d'incendio analitiche (HRR_{Anal}).

Nella tabella vengono riassunte le differenze di comportamento termodinamico delle due funzioni HRR (CIV e analitica) per i tre casi analizzati, oltre al tempo d'intersezione tra le curve ed al tempo per cui si uguagliano le aree sottese (espressione dell'energia termica rilasciata):

1. l'andamento delle funzioni HRR_{Anal} mostra la comune tendenza a sottostimare la pericolosità del fenomeno simulato rispetto a quanto ottenuto per la fase iniziale con la simulazione di incendio verosimile, in particolare fino al raggiungimento del punto in cui le curve si intersecano;
2. la maggiore potenza espressa dalla HRR_{CIV} nella fase iniziale dell'incendio comporta che l'energia termica complessivamente sviluppata dalle due curve a confronto sia la stessa per i tempi riportati in tabella.

Le motivazioni di tale variazione risiedono nelle ipotesi di modello imposte da Thomas, in quanto il valore dell'HRR di flashover e massimo, analiticamente dipendono solo dalle caratteristiche planimetriche del locale e dalla presenza di aperture di ventilazione; il materiale combustibile presente nel compartimento, infatti, viene considerato come carico energetico totale uniformemente distribuito sulla superficie, senza tener conto, quindi, della reale disposizione degli arredi (distanza relativa tra innesco e restanti materiali combustibili).

Questo metodo di valutazione del fire design rappresenta ovviamente una condizione di sollecitazione termica a favore di sicurezza per la verifica strutturale, ma il fenomeno descritto dalla HRR verosimile presenta caratteri di pericolosità più spiccata per un intervallo di tempo che vede, tipicamente, l'attivazione delle procedure di gestione dell'emergenza e dell'autosoccorso degli esposti.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151, Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione incendi.
- [2] D.M. 16 luglio 2014 "Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli asili nido".
- [3] D.M. 9 maggio 2007 "Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio"
- [4] K. McGrattan, R. Mcdermott, S. Hostikka, and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User ' s Guide," *Nist Spec. Publ.*, no. Version 5, p. 220, 2010.
- [5] G. P. Forney, "User's Guide for Smokeview Version 5 - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data," vol. I, no. Version 5, 2007.
- [6] M. Lombardi, G. Rossi, N. Sciarretta, and N. Oranges, "Fire Design: Direct Comparison Between Fire Curves. the Case Study of a Nursery," *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 297–308, Mar. 2013.
- [7] ISO/TR 16738:2009, "Fire-safety engineering -- Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people," 2009.
- [8] ISO/TR 13387-1:1999, "Fire safety engineering -- Part 1," 1999.
- [9] J. X. Wen, K. Kang, T. Donchev, and J. M. Karwatzki, "Validation of FDS for the prediction of medium-scale pool fires," *Fire Saf. J.*, vol. 42, no. 2, pp. 127–138, 2007.
- [10] T. Korhonen VTT, "Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac Technical Reference and User's Guide," 2014.
- [11] S. Gwynne, E. R. Galea, M. Owen, and P. J. Lawrence, "A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment," vol. 34, pp. 741–749, 1999.

- [12] R. Hansen, “Methodologies for calculating the overall heat release rate of a vehicle in an underground structure .”
- [13] NFPA, “NFPA 555: Guide on Methods for Evaluating Potential for Room Flashover,” 2013.
- [14] V. Babrauskas, “Heat Release Rates,” in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, NY: Springer New York, 2016, pp. 799–904.
- [15] “EN 1991-1-2: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire,” 2002.
- [16] Jesus de la Quintana, “Integrated Fire Engineering and Response (IFER).”
- [17] S. M. Systems and L. Spaces, “Nfpa 92B,” *Smoke Manag. malls, atria large areas*, 2005.