SIMULAZIONE DI INCENDI REALI

M. Di Paolo[(1)] , F.A. Ponziani[(1)] , S.Pustorino[(2)]

[(1)] Ministero dell'Interno – Centro Studi ed Esperienze del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
[(2)]Structura Engineering, Livorno

1. SOMMARIO

Lo studio della fenomenologia di un incendio riveste interesse di carattere scientifico e pratico allo stesso tempo.
Tra i modelli proposti per interpretare la dinamica di un incendio, quelli relativi ai cosiddetti *incendi reali* hanno avuto negli ultimi anni un notevole sviluppo.
La applicazione *critica* dei modelli di simulazione di incendi reali che si sviluppano all' interno di un edificio, civile o industriale, può diventare uno strumento utile per la valutazione di taluni parametri di riferimento legati alle condizioni di vivibilità degli ambienti ed alla risposta dell' edificio alle azioni termiche cui è assoggettato.
Questi modelli di simulazione di incendi reali si diversificano dai modelli più classici o semplificati di *incendio convenzionale* per la possibilità di descrivere, in misura più o meno approssimata, le fasi dell' incendio (iniziale, intermedia, finale) tenendo in conto lo *scenario* in cui l' incendio stesso si manifesta.
I modelli relativi agli *incendi reali* ai quali è stato dedicato uno studio critico e comparativo rientrano nella categoria dei cosiddetti *modelli a zone*, caratterizzati da opportuni volumi di controllo la dinamica dei quali sintetizza l' evoluzione dell' incendio, a patto di descrivere le condizioni di sviluppo ragionevolmente prevedibili (studio di *previsione*) od osservate (studio di *verifica*).
Per completezza occorre tener presente che ad un livello di complessità maggiore, sia per la descrizione necessaria che per i risultati ottenibili, sono disponibili o in fase di perfezionamento i cosiddetti modelli di *fluidodinamica computazionale* (*CFD*), che comunque richiedono una accorta interpretazione del modello da adottare.

2. OSSERVAZIONI GENERALI

La possibilità di ricorrere a vari modelli per la simulazione di un incendio è oggi un patrimonio internazionale che comincia ad essere riconosciuto nelle varie normative tecniche. Testimonianza può esserne ad esempio la recente versione dell' Eurocodice 1 parte 2-2 " Azioni sulle strutture esposte all' incendio ", nella quale si presentano in forma *per ora solo informativa* i criteri per la definizione di un incendio reale in alternativa ai differenti incendi convenzionali. [1].
L' impiego di un *modello di incendio reale* (o *naturale*) richiede, in genere, la definizione di una procedura nella quale specificare i *parametri globali* di riferimento, quali: lo *scenario* di incendio, la *configurazione del compartimento* in cui si può sviluppare l' incendio, il *carico di incendio* ed il *tasso di calore rilasciato* (curva RHR).
Questi parametri globali sono, in particolare, fondamentali per la simulazione di un incendio tramite i modelli a zone.

3. DEFINIZIONE DELLO SCENARIO DELL' INCENDIO.

Il primo importante passo da compiere per una corretta simulazione è la definizione dello scenario di incendio.
Si badi che, in ogni caso, lo scenario o gli scenari ipotizzati vanno intesi come approssimazioni alla realtà prevedibile od osservata, assumendo il grado di approssimazione un senso probabilistico vista la varietà dei fattori in gioco. Da questo si capisce non solo l' importanza, ma anche la delicatezza della definizione di scenario.
Fortunatamente cominciano oggigiorno ad essere diffuse e disponibili informazioni su scenari di incendio effettivamente osservati nella realtà, oppure su scenari progettualmente impiegati in situazioni particolari, anche se è auspicabile un approfondimento delle conoscenze e delle indagini su basi sperimentali comparabili.
La descrizione dello scenario di un incendio comporta la definizione di tutte (possibilmente) le condizioni che influenzano il decorso dell' evento che si vuole studiare, considerate tutte e tre le fasi paradigmatiche di evoluzione: iniziale (ignizione e sviluppo), intermedia (propagazione e mantenimento), finale (raffreddamento e spegnimento).
Ponendo come principali *obiettivi* della simulazione di un incendio la *difesa delle vite umane* (condizioni di

vivibilità degli ambienti) e la *salvaguardia delle costruzioni* (risposta dell' edificio alle azioni termiche) – si ricordino tra l'altro i requisiti essenziali della Direttiva Europea sui prodotti da costruzione – le principali condizioni che vanno definite nello scenario di incendio possono riassumersi in:
il *carico di incendio*, in particolar modo la natura, la quantità e la distribuzione del materiale combustibile;
la *geometria del compartimento* in cui si sviluppa l' incendio, incluse le caratteristiche termo-meccaniche dei materiali che costituiscono la frontiera del compartimento;
le *caratteristiche di ventilazione* disponibile, funzione sia delle aperture presenti che della capacità di tenuta durante il tempo dell' incendio dei materiali su esse presenti;
la *posizione dell' incendio*, sia nei riguardi dell' azione termica sulle strutture che nei riguardi della propagazione ed accumulazione dei fumi;
le *misure di protezione attiva* presenti nel compartimento;
le *caratteristiche di resistenza al fuoco* delle strutture portanti dell' edificio.
Un aspetto essenziale da tenere a mente è che la scelta del modello di simulazione e la definizione dello scenario dell' incendio non sono tra loro indipendenti: la scelta del modello più adatto per un dato incendio dipende infatti dallo scenario definito. [2].

4. CONFIGURAZIONE DEL COMPARTIMENTO IN CUI SI SVILUPPA L' INCENDIO.

La valutazione spaziale dell' ambiente in cui si può sviluppare l' incendio viene sintetizzata nel termine *studio della configurazione*. Poiché la progettazione ingegneristica di un edificio assoggettabile ad un incendio fa riferimento ad appositi nuclei spaziali entro i quali delimitare lo sviluppo eventuale dell' incendio stesso, chiamati compartimenti (antincendio), il parametro di riferimento globale del quale occorre occuparsi nella simulazione è ovviamente la configurazione del compartimento.
Per inciso, l' aggettivo antincendio riferito al compartimento non ha la presunzione di escludere la probabilità di accadimento dell' evento incendio, ma ha il significato di indicare la presenza di opportuni accorgimenti progettuali ed operativi volti alla riduzione del rischio incendio.
Lo studio della configurazione del compartimento comporta la iniziale valutazione delle caratteristiche di ostacolo alla propagazione dell' incendio offerte dai differenti elementi che costituiscono fisicamente la frontiera di un certo spazio, quali solai, pareti, soffitti, porte, finestre … .Tramite la valutazione delle caratteristiche di tenuta di questi elementi rispetto al tipo di incendio previsto è possibile, allora, determinare le dimensioni geometriche e le proprietà fisiche del compartimento entro il quale l' incendio può svilupparsi.
A volte può accadere che non sia possibile o rappresentativo mantenere la puntuale corrispondenza tra stanza o stanze reali e compartimento in simulazione: una appropriata analisi potrà consentire l' individuazione dello spazio più adatto per rappresentare la configurazione del compartimento della simulazione.
I successivi due aspetti che vanno valutati sono legati agli scambi di energia tra il compartimento e l' ambiente circostante.
Il primo è relativo alle caratteristiche termiche delle superfici di chiusura dello spazio – in genere partizioni verticali ed orizzontali – attraverso le quali si verificano gli scambi di calore.
Il secondo è relativo alla definizione delle aperture disponibili – volontariamente o involontariamente – durante il decorso dell' incendio.
Quest' ultimo fattore di ventilazione deve essere analizzato nei riguardi della posizione e nei riguardi delle dimensioni, dal momento che sia il quantitativo di ossigeno che alimenta la combustione sia gli scambi di energia termica per convezione ed irraggiamento – oltre che per trasporto di massa – ne sono influenzati.

5. FRONTIERA DEL COMPARTIMENTO.

Un edificio è in via generale composto da più ambienti. La propagazione di un incendio da un ambiente a quelli adiacenti dipende essenzialmente dalle caratteristiche termo-meccaniche di resistenza, tenuta ed isolamento degli elementi di partizione rispetto alla azione termica agente.
In particolare, l' incremento di temperatura sulla faccia non esposta al fuoco di un elemento divisorio deve essere limitata, al fine di evitare l' ignizione di combustibile eventualmente presente al di là del divisorio ed al fine di mantenere l' integrità del divisorio stesso durante il corso dell' evento incendio.
Il metodo più comunemente utilizzato per valutare l' efficacia di un elemento divisorio ad impedire la propagazione dell' incendio è il riferimento ai suoi requisiti di resistenza al fuoco rispetto all' incendio ISO standard. In questi requisiti, infatti, sono incluse le peculiari caratteristiche di tenuta ed isolamento dell' elemento esposto all' incendio.
Sono auspicabili, quando possibile, prove e sperimentazioni apposite che simulino le condizioni allo studio della simulazione, ovvero test appositi su elementi di prova rappresentativi della realtà, ovvero deduzioni fatte da test eseguiti su elementi analoghi. Si otterrebbero in tal caso risultati certamente più affidabili di quelli che derivano da una analisi all' incendio ISO. Sfortunatamente, il costo delle sperimentazioni nelle applicazioni ordinarie indirizza verso il ricorso alle già note prestazioni dei diversi elementi assoggettati alla

curva di incendio standard.
Vale la pena sottolineare la limitazione di un siffatto approccio, seppur comunemente usato: la valutazione di caratteristiche legate ad un incendio reale – o naturale - vengono valutate invece nell' ambito di un incendio standard e specifico. La valutazione, pertanto, deve essere verificata dall' esperienza di colui che sta modellando l' evento incendio: la verifica consiste essenzialmente in un confronto degli effetti sull' elemento considerato tra l' incendio standard e l' incendio reale.

6. APERTURE DEL COMPARTIMENTO.

Le aperture nel compartimento governano il meccanismo della ventilazione associato all' incendio. Elementi caratteristici sono la velocità e la durata della combustione, entrambi correlati al tasso di rilascio energetico RHR (Rate of Heat Release). L' importanza della ventilazione si estende anche alla valutazione degli scambi di energia con l' ambiente circostante, che sia l' esterno oppure un altro compartimento.
Le aperture che più comunemente si incontrano in un compartimento sono: porte, finestre lungo le pareti verticali, lucernari o aperture sul soffitto. Alcuni di questi elementi sono a volte dotati di specifica resistenza al fuoco secondo una esposizione ad incendio standard.
Poiché il pieno sviluppo di un incendio può dipendere dalla quantità di aperture disponibili, è fondamentale assumere durante il decorso dell' incendio dimensioni e posizionamento delle aperture il più possibile aderenti alla realtà: qualora il modello di simulazione di incendio non consentisse la completa rispondenza con la realtà, vanno almeno garantite quelle rispondenze che investono direttamente gli scambi di massa ed energia con l' esterno (per esempio: aree di passaggio, allineamento geometrico dei flussi, …). In assenza di assunzioni più attendibili vanno adottate ipotesi a favore di sicurezza.
Si tenga presente che ciascuna tipologia di modello di simulazione di incendio ha una propria definizione delle aperture disponibili.
Ad esempio, i modelli CFD consentono una descrizione sofisticata, i modelli a zone richiedono localizzazione e dimensione, i modelli di incendio parametrico richiedono appositi parametri semplificativi descrittivi.
L' importanza della ventilazione è confermata dagli sforzi compiuti dai ricercatori di trovare una forma generale rappresentativa, tanto è vero che per una singola apertura verticale la gran parte dei modelli adotta la forma

$$A_w * \sqrt{h}$$

essendo A_w l'area totale ed h la altezza della apertura.
Nel caso di forme rappresentative più complesse, la base di partenza è quasi sempre la stessa sopra descritta.
A causa della complessità della modellazione del flusso di ventilazione durante un incendio, non tutti i modelli consentono la descrizione completa dei tipi di aperture presenti nel compartimento. Nell' ambito dei modelli a zone, per esempio, non tutti i codici di simulazione prevedono la presenza di aperture orizzontali (che sono in genere quelle su soffitto).
Sarà compito di colui che sta analizzando l' incendio con un opportuno modello, lo scegliere la descrizione più appropriata, tra quelle consentite, delle aperture del compartimento.

7. PROPRIETA' TERMICHE DELLE PARETI.

La parte energetica associata alla evoluzione di un incendio trova immediato riscontro nel ruolo delle frontiere fisiche del compartimento antincendio, nella fattispecie partizioni verticali ed orizzontali.
Riferendosi con intento di generalità alle pareti, lo scambio energetico con l'esterno avviene secondo le modalità classiche della trasmissione del calore.
La difficoltà maggiore della modellazione risiede nella descrizione energetica delle fasi transitorie – che d' altronde sono quelle tipiche delle fasi di crescita e di esaurimento dell' incendio – anche se oggi sono disponibili descrizioni sofisticate con diverso grado di approssimazione.
Il parametro comunemente impiegato nella descrizione delle proprietà termiche delle pareti del compartimento antincendio è il *coefficiente di penetrazione del calore*, detto anche fattore b, definito come

$$b = \sqrt{l r c}$$

in cui
λ rappresenta la conduttività termica [$W\ m^{-1}\ K^{-1}$] ,
ρ rappresenta la densità [$kg\ m^{-3}$] ,
c rappresenta la capacità termica [$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$].

Mentre nel caso di parete monostrato le caratteristiche sono riferite all' unico materiale presente, nel caso di pareti multistrato costituite da spessori multipli di materiali differenti, viene calcolato un valore efficace del fattore b che tiene conto del contributo dei diversi strati mediante l' espressione:

$$b = \frac{\sqrt{\sum_i s_i c_i l_i}}{\sqrt{\sum_i \frac{s_i c_i l_i}{b_i^2}}}$$

in cui:
λ_i è la conduttività termica del materiale i-esimo, in [W m^{-1} K^{-1}];
s_i è lo spessore dello strato di materiale i-esimo, in [m];
c_i è la capacità termica del materiale i-esimo, in [J kg^{-1} K^{-1}];
b_i è il fattore b del materiale i-esimo, in [J m^{-2} K^{-1} $s^{-1/2}$]: $b_i = \sqrt{l_i r_i c_i}$;
ρ_i è la densità dell' materiale i-esimo, in [kg m^{-3}].
Il fattore b così calcolato viene utilizzato con il campo di applicazione: 1000<b<2000.
Le proprietà termiche dei materiali variano con la temperatura durante l' evolversi dell' incendio.
La variazione è poco sentita per gli ordinari materiali da costruzione, mentre è significativamente più sentita per i materiali costituenti le protezioni (antincendio) degli elementi strutturali.
Non sempre i modelli disponibili per la simulazione dell' incendio tengono conto di queste variazioni.
In tal caso, se a favore di sicurezza per la severità dell' incendio, si possono assumere i valori delle proprietà termiche dei diversi materiali pari a quelli relativi alla temperatura ambiente.

8. IL CARICO DI INCENDIO.

Il Decreto del Ministero dell' Interno del 30/11/1983 definisce il *carico di incendio* come il potenziale termico della totalità dei materiali combustibili contenuti in uno spazio, ivi compresi i rivestimenti dei muri, delle pareti provvisorie, dei pavimenti e dei soffitti. In pratica il carico di incendio corrisponde alla totale quantità di calore che si svilupperebbe nella combustione completa di tutti i materiali combustibili contenuti nel compartimento.
Il rapporto fra il carico di incendio e la superficie lorda del compartimento definisce il carico di incendio specifico, chiamato dall' Eurocodice *densità del carico di incendio*.
Nell' Eurocodice 1 la densità del carico di incendio è definita dall' equazione:

$$q_{n,f} = \frac{1}{A_f} * \sum_i (\Psi_i m_i H_{ui} M_i)$$

in cui
M_i è la massa del materiale combustibile i-esimo, in [kg];
H_{ui} è il valore del potere calorifico (superiore) del materiale combustibile i-esimo, in [MJ kg^{-1}];
m_i è un coefficiente che descrive il comportamento nella combustione del materiale i-esimo, compreso tra il valore zero (0: assenza di combustione) ed il valore uno (1: combustione totale);
ψ_i è un coefficiente che tiene conto di eventuali protezioni nei confronti della combustione del materiale i-esimo, compreso tra il valore zero (0: protezione completa durante l' incendio) ed il valore uno (1: efficacia nulla della protezione nei confronti del rilascio di energia);
A_f è la superficie del compartimento, in [m^2].
La definizione del carico di incendio, ovvero della corrispettiva densità, dipende dunque dalla natura e quantità del materiale combustibile, ma anche dalla configurazione ambientale.
Il coefficiente di comportamento, ad esempio, tenta di valutare quantitativamente – anche se la scelta del valore numerico è sostanzialmente ancora soggettiva – la completezza di combustione. La combustione di un dato materiale non è a priori generalmente ipotizzabile come completa, essendo influenzata dal tipo di combustibile (solido, liquido, aeriforme), dalle dimensioni e forma del materiale, dalla distribuzione del materiale stesso, dal tipo di incendio che può instaurarsi (temperatura, radiazione termica, ossigeno).
Assumere combustione completa significa adottare una ipotesi conservativa, la quale deve in ogni caso essere ragionevolmente necessaria.
In assenza di migliori informazioni o adeguate garanzie di mantenimento dei requisiti ipotizzati, è comune l' assunzione conservativa $\psi_i = 1$ e $m_i = 1$.

Il calcolo del carico di incendio, ovvero della densità del carico di incendio, può essere fatto analiticamente secondo la specifica dislocazione in esame oppure assumendo valori statistici, medi o frattili appositi, in funzione della destinazione dei locali interessati del compartimento antincendio.
L' uso di valori statistici è consigliabile, visto che il carico di incendio è una tipica grandezza aleatoria - con propria distribuzione di probabilità - a patto che studi ed esperienze ulteriori allarghino il campo della raccolta comparata dei dati relativi.

9. IL TASSO DI CALORE RILASCIATO (CURVA RHR).

Il carico di incendio definisce il quantitativo di energia disponibile per la combustione sotto forma di materiale presente in un dato locale. Non definisce le modalità di rilascio dell' energia.
Per descrivere la dinamica di sviluppo di un incendio, del resto, sono proprio le *modalità di rilascio energetico* a giocare un ruolo fondamentale. La variazione spazio-temporale della liberazione di energia dal materiale combustibile governa gli scambi del *sistema termodinamico materiale combustibile-ambiente*, e l' andamento delle *temperature dei gas* sviluppati.
Si pensi come, infatti, uno stesso carico di incendio possa bruciare con differenti velocità a seconda delle particolari condizioni che si instaurano, dipendenti e dal materiale (quantitativo, pezzatura …) e dall' ambiente (volumetria, aperture …), dando origine a temperature nel locale coinvolto anche molto diverse da caso a caso. [3].
Sulla base di numerosi test eseguiti in campo internazionale, l' andamento delle modalità di *rilascio energetico* - chiamato anche *tasso di calore rilasciato* oppure *Rate of Heat Release RHR* oppure *potenza termica* – viene descritto da tre fasi caratteristiche: iniziale, intermedia, finale.
La descrizione delle tre fasi viene preferibilmente basata su modelli matematici semplici (figura1). Nel tratto iniziale la curva RHR cresce in genere con legge quadratica, con incremento di pendenza più o meno accentuato secondo la velocità di combustione; questa fase iniziale di RHR in funzione del tempo può comprendere oltre alla fase di ignizione e sviluppo dell' incendio, anche la fase di ignizione generalizzata (flashover) dell' incendio stesso.
Il tratto intermedio della curva RHR viene assunto stazionario, nell' ipotesi che la massa bruciata di combustibile - proporzionale in vario modo al tasso di rilascio del calore – rimanga costante nel tempo.
Il tratto finale della curva RHR decresce dal valore stazionario al valore nullo, secondo un andamento in genere lineare, a partire da un certo quantitativo di carico di incendio bruciato, ad esempio il 70%.
L' importanza della curva RHR risiede nel duplice fatto di descrivere la dinamica di un incendio e di costituire uno dei dati di ingresso (input) e di uscita (output) per i modelli di simulazione a zone.
Prendendo come riferimento significativo il flashover di un incendio entro un ambiente chiuso (quando ovviamente il flashover stesso si manifesta), la fase iniziale di RHR descrive le condizioni pre-flashover, le condizioni di flashover e le condizioni principalmente di transizione post-flashover; la fase intermedia di RHR descrive le condizioni post-flashover dell' incendio nel locale o compartimento.
Descrizioni diverse possono essere adottate in casi particolari.
Nell' ambito degli incendi al chiuso (compartment fire, room fire) il manifestarsi del flashover sembra potersi interpretare come un punto singolare del sistema.
Altro punto singolare sembra essere il meccanismo schematico di guida della dinamica dell' incendio, almeno da una certa fase in poi, rappresentato dalle alternative di *controllo incendio da combustibile* e di *controllo incendio da ventilazione*, ciascuno prevalente secondo il mutuo legame tra combustibile disponibile e ventilazione disponibile, dettando il valore minimo dei due, secondo vari criteri, il meccanismo che si instaura nell' ambito dell' incendio al chiuso.
Al variare dinamico delle condizioni, d' altro canto, sono stati osservati dei passaggi tra i due meccanismi di controllo dell' incendio, anche se la possibilità di reversibilità è tuttora in fase di studio, almeno nei riguardi di una reversibilità totale cioè su scala totale.

10. LA FASE INIZIALE DELLA CURVA RHR.

La modellazione matematica della fase iniziale di potenza termica di un incendio è espressa in via generale dalla relazione:

$$RHR = \left(\frac{t}{t_a} \right)^2$$

nella quale
RHR è la potenza termica rilasciata nella fase iniziale di crescita dell' incendio, espressa in [MW];
t è il tempo, espresso in [s];

t_α è una costante (di tempo) caratteristica, espressa in [s], che dipende dalla destinazione del compartimento ovvero dalla natura del combustibile. Questa costante esprime il tempo necessario all' incendio per raggiungere una potenza prefissata, in genere 1 MW.
L' esponente 2 ovviamente definisce il tasso di crescita RHR parabolico ordinario, anche se esponenti diversi sono stati proposti ed utilizzati in alcuni casi.

Tra questi, un caso corrisponde all' esponente 1 di crescita lineare, utilizzato sia come scelta di modellazione che come strumento semplificativo di stima. Un altro caso, meno utilizzato, corrisponde all' esponente 3 di crescita parabolica del terzo ordine.
Per avere una idea dei valori numerici diffusi in letteratura, e prescindendo dalla destinazione del compartimento che pure deve essere considerata, la costante t_α necessaria a raggiungere 1 MW assume i seguenti quattro gruppi di valori caratteristici: 75 s nel caso di crescita ultra-veloce, 150 s nel caso di crescita veloce, 300 s nel caso di crescita media, 600 s nel caso di crescita lenta.
Modellazioni differenti, benché non diffuse, non vanno escluse a priori, nel caso trovino conforto in sperimentazioni apposite. Potrebbe essere in questo caso il principio di ripetibilità delle condizioni e di comparazione dei dati a fornire un ragionevole indicatore per un criterio di scelta.

11. LA FASE INTERMEDIA DELLA CURVA RHR.

A parità di carico di incendio in quanto a distribuzione e caratteristiche, la modalità con cui avviene la combustione dipende dalla configurazione del locale e può svilupparsi secondo *due diversi meccanismi*.
Qualora nel locale sia presente un quantitativo di ossigeno sufficiente, secondo vari criteri, per sostenere la combustione, il massimo valore della curva RHR dipende dalla quantità di combustibile presente, e l' *incendio* si dice *controllato dal combustibile* (*fuel bed control*).
Qualora, invece, il quantitativo di ossigeno disponibile sia insufficiente cioè la ventilazione sia insufficiente, il massimo valore della curva RHR dipende dal quantitativo di ossigeno disponibile e l' *incendio* si dice *controllato dalla ventilazione* (*ventilation control*).
Questi meccanismi di controllo dell' incendio possono instaurarsi durante tutte le tre fasi paradigmatiche dell' incendio stesso, tranne in genere i primissimi istanti in cui la dinamica di un incendio al chiuso è simile a quella di un incendio all'aperto.
In particolare, è nella fase intermedia della curva RHR che di questi due meccanismi si tiene esplicitamente conto tramite opportune equazioni matematiche.
Nel quadro dei recenti studi sull' argomento possono essere segnalati tre diversi approcci per la valutazione della curva RHR durante la fase intermedia stazionaria:
1) un approccio analitico per ambienti che vengono completamente coinvolti dall' incendio;
2) un approccio basato su dati sperimentali, che forniscono i valori di RHR su m^2 di superficie, nel caso di un incendio che rimane localizzato;
3) un approccio totalmente basato su dati sperimentali.

11.1. Approccio analitico per ambienti completamente coinvolti dall' incendio.

Uno dei primi approcci rientranti in questa categoria è il modello di Kawagoe relativo ad incendi controllati dalla ventilazione, descritto dall' equazione empirica:

$$R_m = 0.091 A_w \sqrt{h_a}$$

nella quale
R_m rappresenta la massa di combustibile bruciata nell' unità di tempo, espressa in [kg s^{-1}].
(Ci si riferisce in genere a kg di legna equivalente, variando di poco i valori numerici a seconda del valore di equivalenza prescelto, dipendente dal potere calorifico assunto per la legna).
A_w rappresenta l' area totale delle aperture del compartimento, espressa in [m^2];
h_a rappresenta l' altezza media delle aperture del compartimento, espressa in [m].
Formulazioni più recenti hanno comportato valori del coefficiente numerico diversi (in genere non molto diversi, per cui il valore originario 0.091 conserva valenza significativa).
In presenza di più di una apertura nel locale considerato occorre utilizzare equazioni leggermente modificate, un po' diverse da caso a caso ma tutte con la base concettuale comune costituita dalla equazione per singola apertura sopra indicata.
Un' altra formulazione analitica è riportata nell' Annex C dell' Eurocodice ENV 1991-2-2, descritta dalla relazione:

$$R=\min\left\{\left(\frac{L}{t_f}\right),0.18\left(1-e^{-0.036h}\right)A_w\left(h\frac{W}{D}\right)^{1/2}\right\}$$

in cui
R è il tasso di combustione, cioè la massa di combustibile bruciata per unità di tempo, espressa in [kg_{legna} / s] – quindi $RHR=R*H_{legna}$ in modo che $[MW]=[kg_{legna}/s]*[MJ/kg_{legna}]$;
L è il carico di incendio complessivo, espresso in [kg_{legna}];
τ_f è la durata della combustione, assunta pari a 1200 s, per il caso di incendio controllato dal combustibile;
A_w è la somma dell' area delle aperture su tutte le pareti, espressa in [m^2];
h è il valore medio dell' altezza delle finestre su tutte le pareti, espressa in [m], tale cioè che

$$h=\frac{\sum_i A_{wi}h_i}{\sum_i A_{wi}}\equiv\frac{\sum_i A_{wi}h_i}{A_w}$$

W è la dimensione del compartimento nella direzione dei muri contenenti finestre, espressa in [m];
D è l' altra dimensione del compartimento, epressa in [m];

$$h=\frac{A_T}{A_w\cdot\sqrt{h}}$$

espressa in [$m^{-1/2}$], essendo
A_T l' area di tutte le superfici del compartimento (pavimento, soffitto, pareti), escluse quelle delle finestre, espressa in [m^2].
Opportune correzioni tengono conto di aperture eventualmente presenti su più di una parete del compartimento.
Tra i due termini riportati nella espressione dell' ENV deve essere preso in considerazione il minimo.
Di questi stessi termini, il primo è relativo al caso di incendio controllato dal combustibile, mentre il secondo è relativo al caso di incendio controllato dalla ventilazione.
E' da notare che il termine relativo al controllo di ventilazione risulta in linea con le impostazioni degli studi internazionali e delle normative europee più recenti; il termine relativo al controllo di combustibile è invece meno accurato, tanto è vero che la durata convenzionale di combustione viene assunta sempre pari a 20 minuti, indipendentemente dalla particolare situazione che dovesse rientrare nell' ambito del meccanismo di controllo incendio da combustibile.
In quest' ultimo caso può risultare più attendibile adottare valori di RHR per unità di area, che vanno poi estesi a tutta la superficie del compartimento.
I valori di RHR per unità di area sono tratti da dati sperimentali, e costituiscono la base dati del secondo tipo di approccio: l' approccio 2).

11.2. Approccio basato su dati sperimentali per incendi localizzati.

Alcuni dati ricavati per via sperimentale e raggruppati per condizioni omogenee sono attualmente disponibili in letteratura, riferiti ad incendi al chiuso che rimangono localizzati e sono controllati dal combustibile.
Ci si riferisce in questi casi al valore RHR_f , espresso in [W m^{-2}].
Esempi tipici sono i valori
RHR_f = 250 kW/m^2 per edifici adibiti ad uffici,
RHR_f = 500 kW/m^2 per edifici commerciali.
I valori sono in genere associati alle destinazioni d' uso degli ambienti e, più raramente, alle condizioni funzionali di impiego del materiale combustibile.
Moltiplicando il valore di RHR_f (consono alla situazione che si sta esaminando) per la superficie A_f prevista dell' incendio, si ottiene un valore della potenza termica rilasciata più attendibile, salvo casi particolari, di quello proposto come (L/τ_f) precedentemente riportato. Il tutto è ovviamente riferito alla fase stazionaria di RHR per incendi al chiuso sotto il controllo del combustibile, espressa da $RHR = RHR_f * A_f$.
Non si deve, comunque, trascurare la delicatezza di una scelta appropriata dei valori di riferimento, sia per RHR_f che per A_f.

E’ per questo che sarebbero auspicabili, pure in questo caso, studi e sperimentazioni apposite volte ad individuare basi di dati comparabili per scenario, configurazioni ed esperienze.

11.3. Approccio totalmente basato su dati sperimentali.

Questo terzo tipo di approccio è caratteristico ovviamente dei Centri Internazionali di Ricerca.
La valenza di questo approccio è primariamente quella di aumentare il livello di conoscenze disponibili, relative ad insiemi il più possibile omogenei di osservazione, in modo da investigare da un lato la particolarità di una situazione riscontrabile nella realtà (ad esempio incendio di un edificio, incendio di una stanza, incendio di una specifica categoria di materiali combustibili, incendio di varie categorie di materiali combustibili simultaneamente presenti …), e dall’ altro in modo da comprendere e riscontrare quegli aspetti trasversali che si manifestano (ad esempio evoluzione termodinamica dei gas di combustione, interferenze tra i materiali, effetti di scala dell’ ambiente …).
Conseguenza è lo sviluppo di appositi modelli di rappresentazione, più o meno sofisticati, ma anche l’ acquisizione di curve RHR sperimentali.
Esistono varie tecniche sperimentali disponibili per il riconoscimento e l’ acquisizione delle curve RHR sperimentali, che vanno dalla registrazione del quantitativo di materiale che partecipa alla combustione alla misura del consumo di ossigeno.
Alla attendibilità dei risultati ottenibili si accompagna, tuttavia, la delicatezza dell’ impostazione sperimentale ed il costo economico.
Ad ogni modo, sono oggi disponibili in letteratura taluni database di curve RHR sperimentali riferite, per lo più, ad oggetti comunemente impiegati nelle abitazioni e nei luoghi di lavoro: dal singolo tavolo, alla scrivania con sedie, alle librerie di diverse dimensioni, e così via.
Da questi database può essere anche possibile estrarre, secondo i casi, valori significativi di riferimento puntuale per la simulazione, quali valori di picco o valori medi.
L’ aspetto più utile è l’ assunzione della curva RHR sperimentale per intero come modellazione di riferimento, il che è ragionevolmente accettabile nel caso ci si possa riferire a classi di oggetti parimenti presenti nella sperimentazione di riferimento e nella realtà da simulare, tanto più quanto più le due configurazioni complessive di riferimento e di realtà sono vicine. Qualche problema di scelta ed interpretazione dei risultati può nascere in caso di configurazioni complessive eccessivamente differenti nelle due situazioni, ma in questi casi è la curva RHR sperimentale stessa che sarebbe bene mettere in discussione come scelta o, addirittura, sarebbe bene non adottare.
Altro possibile caso di conflittualità fra curve RHR sperimentali e situazione in esame si manifesta a causa della non accertata sovrapponibilità lineare degli effetti tra più curve RHR contemporanee , soprattutto in presenza di forti ritorni di radiazione termica sulla sorgente termica stessa (si pensi alla trasmissione del calore per irraggiamento governata dalla quarta potenza della temperatura assoluta, fatti salvi i casi di approssimazioni linearizzate non sempre applicabili).
E’ preferibile in questi casi, quando anzi non necessario, fare riferimento ad una unica curva sperimentale RHR cumulativa di una unica configurazione, composta gia di per se stessa di più oggetti contemporaneamente.
Ad esempio, la curva RHR deriva da set tavolo-set divano-set libreria contemporaneamente presenti e viene complessivamente rilevata nella configurazione sperimentale, tanto migliore quanto più prossima alla configurazione reale in esame; e non vanno considerate separatamente una RHR per set-tavolo singolarmente più una RHR per set-divano singolarmente più una RHR per set-libreria singolarmente, seppur rilevate nella stessa configurazione in istanti diversi.
L’ accurata impostazione sperimentale, inoltre, comporta il vantaggio di potersi riferire alla curva RHR sperimentale, singola o cumulativa, non soltanto per la fase intermedia stazionaria, ma anche per le fasi iniziali e finali, soprattutto quando lo scenario e la configurazione sono elementi di comparazione utilizzabili direttamente.
Ancora una volta, appare evidente l’ importanza degli studi per affinare le conoscenze ed individuare i parametri e le funzioni sperimentali adottabili come riferimento.

12. LA FASE FINALE DELLA CURVA RHR.

Una volta descritte le fasi iniziali ed intermedie, la modellazione della curva RHR è volta a descrivere la fase finale cioè conclusiva dell’ evoluzione dell’ incendio espressa dalla potenza termica dello stesso.
La fase finale descrive il raffreddamento e lo spegnimento dell’ incendio naturale, differenziandosi particolarmente in questo da altri modelli di simulazione, quali le curve di incendio standard, le quali non prevedono nella propria descrizione semplificata una fase conclusiva di abbassamento delle temperature in gioco.
A partire dalla fase intermedia di potenza termica rilasciata occorre raggiungere il valore nullo

corrispondente all' esaurimento del manifestarsi dell' evento incendio considerato.
Non si ha per questo tratto finale la stessa mole di informazioni riferite al tratto precedente, tuttavia sulla base di osservazioni ed esperienze condotte sembra oggi accettata l' ipotesi di una variazione lineare.
Variazioni diverse non sono da escludersi a priori, benché quella lineare abbia il pregio della semplicità e dell' immediatezza.
Aspetto importante è il decidere l' inizio del tratto finale (lineare): si prende in genere come riferimento l' essere giunti al 70% di carico di incendio bruciato. Altre percentuali indicate in letteratura, in genere poco diverse, non cambiano di molto la rappresentazione.
Considerando poi il quantitativo di energia termica totale disponibile, rappresentata non solo dall' integrale temporale della curva RHR di potenza termica ma anche dal carico di incendio totale, si definisce il tempo di durata finale in cui la curva RHR raggiunge il valore nullo.
A volte vengono, invece, considerate durate convenzionali complessive dell' incendio, dalle quali dedurre la durata del tratto finale della curva RHR.
In ogni caso l' elemento qualitativo peculiare associato a questo tratto finale della curva RHR è la possibilità di rappresentare nella simulazione il periodo dell' evento incendio che naturalmente ne descrive il concludersi: e cioè il raffreddamento e lo spegnimento dell' incendio per l' appunto naturale.
Si tenga presente che l' aggettivo naturale, così come l' aggettivo reale, sono riferiti ad incendi che sono sì ancora simulati da un modello matematico, ma che comunque mantengono le caratteristiche tipiche di un incendio che avviene nella realtà, a differenza di quanto non rappresenti un incendio standard, utile per altri motivi, ma con una dinamica finale totalmente diversa.

13. MODELLI MATEMATICI PER LA DESCRIZIONE DI UN INCENDIO AL CHIUSO.

La dinamica di un incendio al chiuso può convenientemente essere descritta dalle seguenti 5 fasi rappresentative:

1. la prima è la *fase di ignizione* dell' incendio, durante la quale la temperatura media dei gas non è particolarmente elevata e non compromette la capacità portante della struttura del fabbricato;
2. la seconda è la *fase di sviluppo* dell' incendio, durante la quale la temperatura associata all' incendio aumenta molto velocemente;
3. la terza è la *fase di ignizione generalizzata*, o *flashover*, che avviene in un intervallo di tempo molto più rapido (al limite istantaneamente) rispetto a quelli delle altre fasi. Il flashover è caratterizzato dall' ignizione di tutti i materiali combustibili presenti nel compartimento e dal passaggio da stato di incendio più o meno localizzato a stato di incendio diffuso a tutto il compartimento stesso.
   Sono stati proposti vari criteri matematici per l' individuazione del flashover (raggiungimento di una determinata temperatura media dei gas prodotti dall' incendio; raggiungimento di un determinato valore di irraggiamento termico a pavimento; abbassamento oltre una certa soglia dei gas caldi …), ciascuno con pregi e difetti.
4. La fase successiva è caratterizzata da una *fase di pieno sviluppo* dell' incendio;
5. la fase finale è la *fase di raffreddamento*.

Naturalmente, non è detto che tutte le 5 fasi siano presenti: si pensi agli incendi che si autoestinguono rapidamente (presenza delle sole fasi 1 e 5), oppure agli incendi che non arrivano al flashover (fasi 1, 2, 5).
Si tenga presente, inoltre, che le precedenti vogliono essere solo comode schematizzazioni, utilizzabili insieme con altre schematizzazioni parimenti utili.
Ad esempio, nell' ambito della suddivisione paradigmatica dell' incendio utilizzata nella descrizione delle curve RHR, la fase iniziale RHR può corrispondere alle precedenti fasi non solo 1 e 2, ma anche 3; la fase intermedia RHR corrisponde alla fase 4: in assenza di flashover la descrizione di sviluppo sarà ovviamente consona alla situazione instauratasi; la fase finale RHR corrisponde alla precedente fase 5.
Oppure, le precedenti fasi 1 e 2 corrispondono allo stato di pre-flashover, mentre le fasi 4 e 5 allo stato di post-flashover.
Ad ogni modo, prescindendo dalla schematizzazione scelta, la seguente panoramica presenta i modelli di simulazione di incendio oggi più diffusi.
Si parte dai modelli più semplici per arrivare a quelli più complessi.

13.1. Curve di Incendio Nominale.

Sono i modelli finora più usati. Con essi vengono descritti incendi post-flashover, nei quali si considera il compartimento coinvolto dall' incendio fin dall' inizio, trascurando la prima fase iniziale.
La definizione della curva temperatura dei gas versus tempo è di tipo convenzionale e non dipende da alcun parametro fisico. La temperatura viene assunta uniforme nel compartimento. Non si prevede neppure una fase finale di raffreddamento.
Esempi: curva temperatura-tempo standard, curva di incendio per esterni, curva degli idrocarburi (figura2).

13.2. Curve Parametriche di Incendio.

Anche questi modelli descrivono incendi post-flashover, con temperature uniformi nel compartimento durante tutto l' evento.
Si utilizzano però in questo caso alcuni parametri fisici che caratterizzano lo scenario dell' incendio. Inoltre i modelli parametrici descrivono, anche se in modo approssimato, la fase finale di raffreddamento.
Esempi: curve parametriche dell' Annex B dell' ENV 1991-2-2.
Queste curve, assoggettate ad alcune limitazioni specificate, risultano funzione del carico di incendio, delle caratteristiche geometriche e di ventilazione del locale, e delle proprietà termiche delle pareti (figura 3).

13.3. Modelli a Zone.

Questi modelli forniscono indicazioni sull' andamento nel tempo delle temperature dei gas prodotti dall' incendio, sulla localizzazione degli strati di gas più caldi rispetto ai più freddi, e sulle caratteristiche di propagazione dei fumi nei volumi chiusi interessati dall' incendio.
Particolarità di questi modelli è la suddivisione del compartimento in zone volumetriche all' interno delle quali considerare uniformi talune caratteristiche tipiche dei gas prodotti in un incendio: in particolare le temperature.
A seconda del numero di zone considerate, i modelli si distinguono in modelli ad una zona e modelli a più zone, solitamente a due zone.

13.3.1. Modelli ad Una Zona.

In questi modelli la temperatura è uniformemente distribuita con unico valore, variabile nel tempo, all' interno del compartimento.
Sono pertanto modelli adatti a descrivere un incendio pienamente sviluppato, tipicamente un incendio post-flashover. [4].
L' andamento nel tempo della temperatura dei gas, cioè dell' unico gas virtualmente presente, viene calcolato tramite un bilancio di massa e di energia su tutto il compartimento (figure 4,5,6).
L' applicazione di questi modelli richiede una maggiore definizione dei dati di ingresso necessari rispetto ai più semplici modelli nominali e parametrici; tra questi dati ricordiamo la descrizione della frontiera e delle aperture del compartimento nonché il carico di incendio. Elemento di novità è, invece, la necessità di operare una previsione delle modalità di sviluppo dell' incendio, attraverso la definizione della curva RHR di rilascio energetico.

13.3.2. Modelli a Più Zone (o Multizonali).

Questi modelli vengono utilizzati quando l' incendio all' interno del compartimento rimane localizzato oppure non arriva al flashover, cioè quando si tratta di incendi di tipo pre-flashover. In questi casi l' ipotesi di unica temperatura uniforme per tutto il volume del compartimento non è più valida. [5].
Il più semplice modello è quello a due zone, in cui il compartimento viene diviso appunto in due zone, quella dei gas caldi e quella dei gas freddi, ciascuna con propria unica temperatura uniforme variabile nel tempo. La zona dei gas caldi tenderà man mano a disporsi al di sopra della zona dei gas freddi in modo che l' interfaccia tra le due zone scenda verso il basso. Il collegamento fra le due zone avviene attraverso una sorta di pennacchio che funziona da pompa che trasferisce entalpia dalla zona fredda inferiore, ove sono contenute le risorse energetiche sotto forma di carico di incendio, alla zona calda superiore, rappresentativa in modo anche intuitivo dell' effetto termico dell' incendio.
Le equazioni di bilancio di massa ed energia vengono risolte per ciascuna zona, e per ogni zona vengono fornite come dati di uscita le temperature in funzione del tempo. Altro dato significativo di uscita è la variazione nel tempo dell' altezza di interfaccia strato caldo-strato freddo.
Anche questi modelli richiedono in ingresso la previsione delle modalità di sviluppo dell' incendio, ed in molti casi sono presenti sub-modelli che durante tutto il fenomeno controllano la combustione in base alla quantità di ossigeno a disposizione.
Un caso particolare di modello multizonale è quello che tratta più compartimenti: gli scambi di massa ed energia avvengono non soltanto fra il compartimento in cui si verifica l' incendio e l' esterno, ma anche fra il compartimento in cui si origina l' incendio e gli altri compartimenti adiacenti.
Questa modellazione consente quindi di trattare più di un compartimento alla volta, e non è più necessario considerare come ambiente esterno un compartimento adiacente al compartimento originariamente coinvolto dall' incendio.
Poiché spesso una singola stanza assume il ruolo di compartimento, risulta evidente il beneficio; per contro,

aumentano la complessità del modello e la complessità dei metodi di controllo e verifica della simulazione. Si ricordi, a tal proposito, che l' uso dei modelli a zone richiede una continua attenzione da parte dell' utilizzatore, il quale deve controllare che le ipotesi di partenza assunte dal modello siano sempre verificate.

13.4. Modelli di Fluido Dinamica Computazionale.

Sono i modelli matematici più complessi oggi a disposizione. Richiedono particolari conoscenze sia come esperienza numerica che come esperienza descrittiva.
I dati di ingresso sono simili a quelli richiesti dai modelli a zone, con l' aggiunta della scelta del modello fluidodinamico appropriato alla situazione in esame.
Le equazioni di massa ed energia vengono risolte passo passo all' interno del dominio utilizzato per descrivere il volume del compartimento interessato dall' incendio.
La maggiore complessità richiede, inoltre, un impegno di calcolo maggiore di quello richiesto ai modelli multizonali. Si può raggiungere per contro un livello di dettaglio notevolmente superiore.
E' opportuno puntualizzare, tuttavia, che non sempre il modello più sofisticato produce il risultato più utile: ciò dipende infatti dalle finalità della particolare simulazione in esame.
Ad esempio, un modello parametrico potrebbe essere utile per una stima rapida, mentre un modello ad una zona potrebbe essere utilizzato per descrivere una situazione post-flashover.
Oppure il passaggio da un modello a due zone ad un modello ad una zona potrebbe descrivere l' evoluzione di uno scenario da pre- a post- flashover.
Quando invece si richiede uno studio particolarmente dettagliato, i modelli di fluidodinamica computazionale sono da preferire.
Anche le curve nominali, per finire, possono trovare utile impiego nella comparazione dei dati sui requisiti di resistenza al fuoco standard degli elementi costruttivi, oppure possono fornire criteri di stima basati su metodologie di prova ampiamente sperimentate.

14. BIBLIOGRAFIA

[1] ENV 1991-2-2, Eurocode 1 Basis of design and actions on structures Part Actions on structures exposed to fire. UE.
[2] CEC Agreement upon Natural Fire Safety Concept. UE.
[3] D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics. USA.
[4] Università di Liegi, OZONE Proposta di Modello Simulazione Incendio ad Una Zona. UE.
[5] NIST, An update guide for HAZARD I version 1.2. USA.

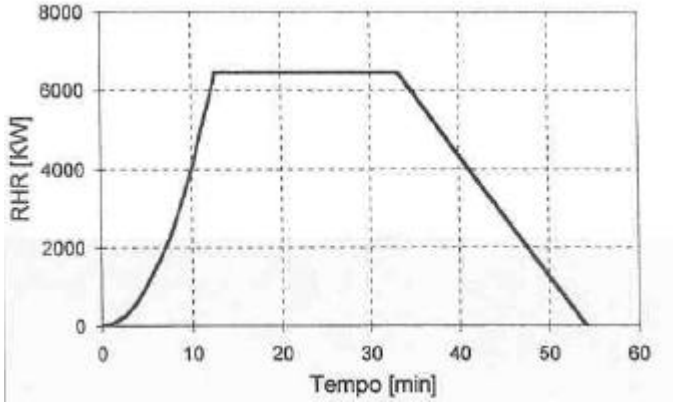

Figura 1. Curva RHR dell'incendio

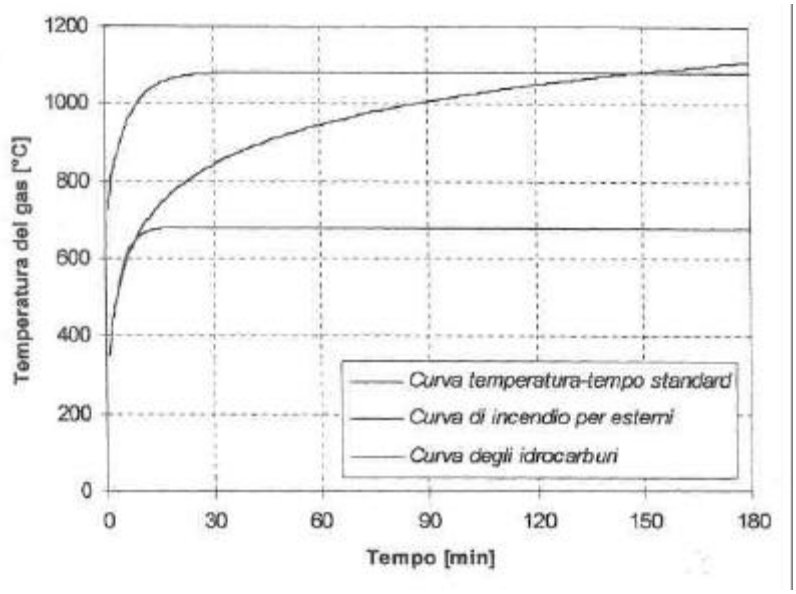

Figura 2. Curve di incendio nominali

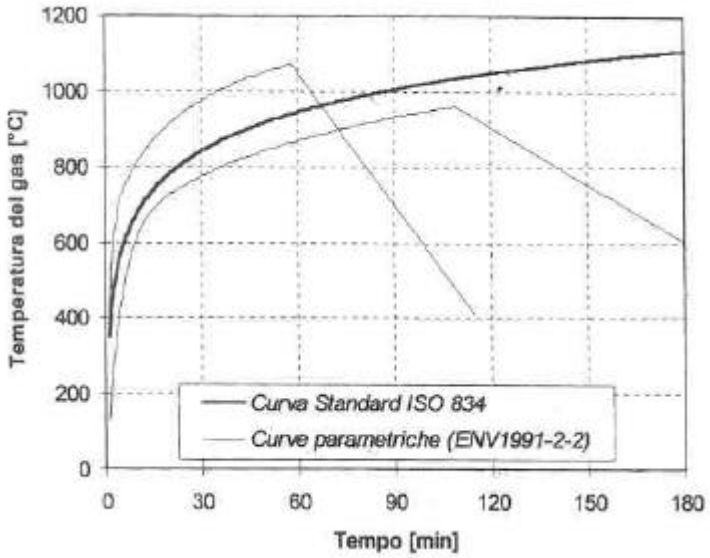

Figura 3. Curve parametriche di incendio e curva di incendio standard

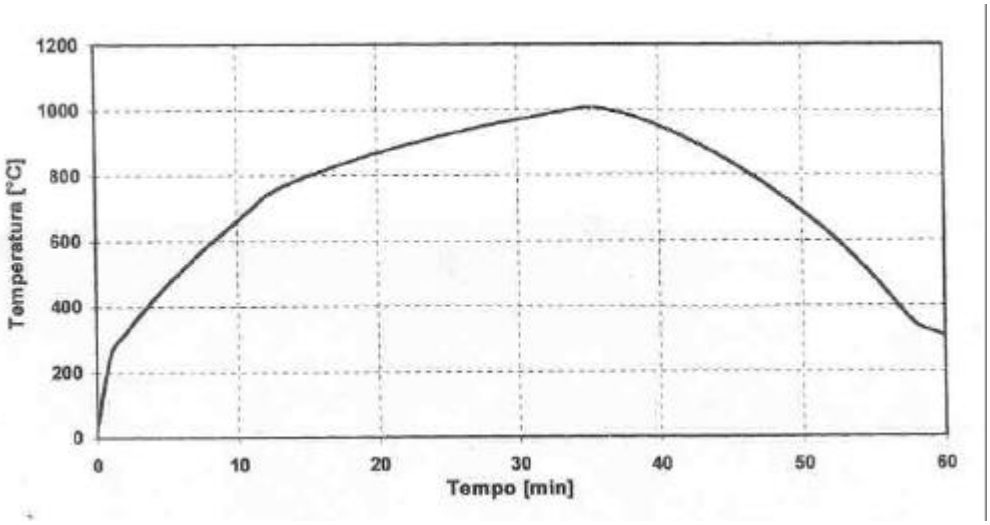

Figura 4. Temperatura dei gas nel compartimento

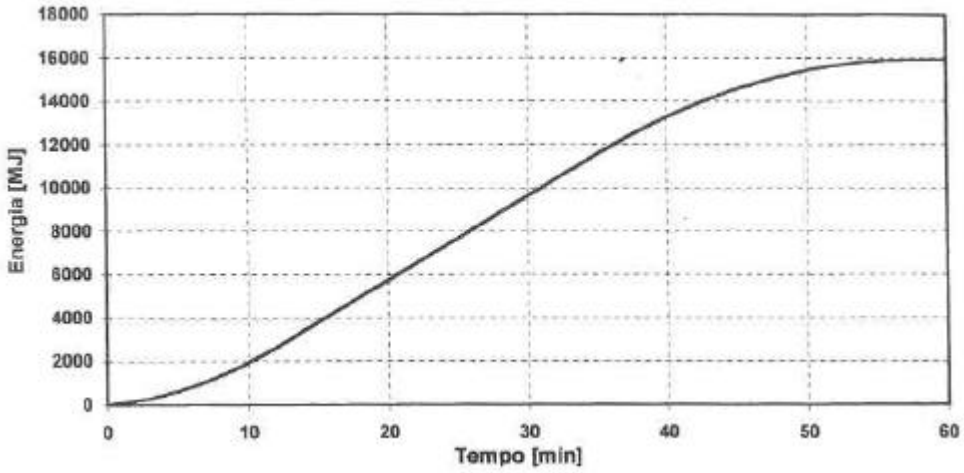

Figura 5. Energia rilasciata dall'incendio

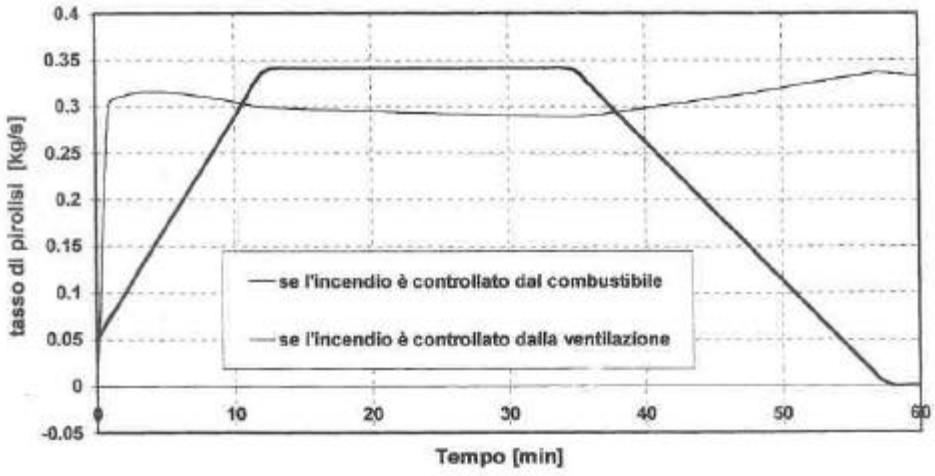

Figura 6. Tasso di pirolisi dell'incendio