

# APPLICAZIONE DEL MODELLATORE DI INCENDI CFAST CON UNA CURVA TEORICA DEL TASSO DI RILASCIO TERMICO

Prof. Piero Masini<sup>(1)</sup>, Prof. Ubaldo Ayr<sup>(1)</sup>, Ing. Maria Romano<sup>(1)</sup>, Ing. Fedele Decandia<sup>(2)</sup>  
Ing. Luigi Pappalettera<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Politecnico di Bari - Via E. Orabona, 4 – 70125 - Bari

<sup>(2)</sup> Comando Prov.le VV.F. – Bari – Via Tupputi, 52 – Bari

<sup>(3)</sup> Libero Professionista

[m.romano@poliba.it](mailto:m.romano@poliba.it)

## SOMMARIO

L'importanza di disporre di strumenti di previsione in grado di descrivere le modalità di sviluppo e di propagazione di un incendio all'interno di un ambiente confinato, è oggi di fondamentale importanza per la progettazione corretta di ambienti abitativi e lavorativi e per la verifica del livello di sicurezza antincendio.

Il presente lavoro si propone di testare alcuni algoritmi teorici per misurare e diagrammare la variazione nel tempo della potenza termica totale rilasciata nell'ambiente, a seguito di un incendio, con la finalità di ottenere valide considerazioni di supporto alla fase progettuale.

In particolare, si è inteso tarare il modello di calcolo CFAST elaborato dalla NIST, con una curva teorica rappresentante l'andamento temporale del tasso di rilascio termico ottenuta utilizzando due algoritmi, con i quali sono state definite le fasi crescenti, costante e decrescente della predetta curva.

I dati di confronto rinvenivano da una esperienza reale consistente in prove d'incendio pilotate in ventilazione, condotte in un appartamento di un fabbricato per civile abitazione di altezza antincendio superiore a 24 mt.

## 1. INTRODUZIONE

I criteri progettuali riguardanti la prevenzione incendi negli edifici ad uso civile risultano di fondamentale importanza in fase di dimensionamento delle strutture, delle vie di esodo, degli impianti di allarme e di spegnimento. A supporto del progettista, vi è oggi la possibilità di utilizzare modelli di simulazione di incendi in grado di descrivere come un incendio può svilupparsi e propagarsi all'interno di un ambiente confinato. Tuttavia, quasi tutti i modellatori di incendi richiedono come dato di input la curva della potenza termica rilasciata durante l'incendio o della velocità di pirolisi dei materiali combustibili presenti all'interno dell'ambiente.

Una corretta previsione di queste informazioni non è sempre agevole perché dipendono, oltre che dalle caratteristiche del combustibile, anche dalle condizioni ambientali indotte dallo stesso incendio, come ad esempio il flusso radiativo di ritorno proveniente dalle pareti e dai gas caldi.

Esistono, tuttavia, alcuni algoritmi di semplice applicazione che consentono di costruire una curva del tasso rilascio termico in base al carico di incendio esistente ed al grado di ventilazione nell'ambiente.

La finalità di questo lavoro è quella di confrontare i risultati forniti da un modellatore di incendi, il CFAST, quando la curva di potenza termica rilasciata viene costruita con algoritmi teorici, implementati nello stesso codice, con i risultati forniti dallo stesso modellatore quando, invece, viene utilizzata una curva del tasso di rilascio termico ricavata da dati misurati in fase di sperimentazione.

Nel caso in esame si fa riferimento a prove sperimentali condotte all'interno di un edificio in cui si sono realizzati eventi di incendio in scala reale, di cui si è già trattato in precedenti lavori [1], [2].

Il software CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport) utilizzato in questo lavoro implementa un modello previsionale a due zone sviluppato negli Stati Uniti, presso il Building and Fire Research Laboratory del National Institute of Standards and Testing.

## 2. CURVA DEL TASSO DI RILASCIO TERMICO

Lo sviluppo di un incendio all'interno di un ambiente può essere illustrato con riferimento all'andamento temporale della potenza termica rilasciata durante l'incendio (Fig. 1). Tale curva permette di individuare alcuni fasi specifiche dello sviluppo di un incendio: l'ignizione, lo sviluppo preflashover, il flashover (flames flash over), che segna la transizione da un incendio localizzato ad un incendio generalizzato, in cui tutte le superfici combustibili bruciano contemporaneamente, l'incendio completamente sviluppato e il decadimento finale.

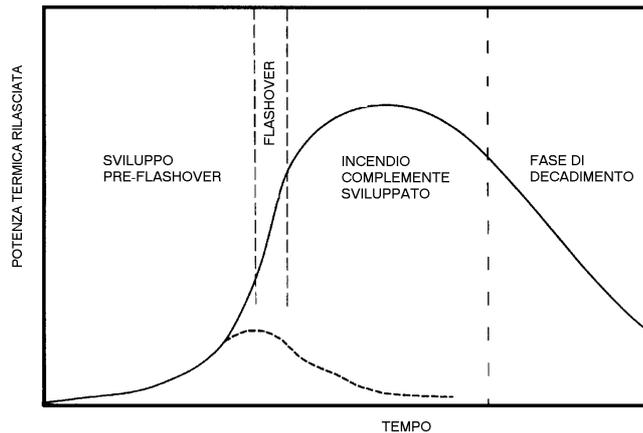


Fig. 1 – Fasi di sviluppo di un incendio (a tratteggio in assenza di flashback)

La curva del tasso di rilascio termico durante un incendio dipende dalla velocità di pirolisi dei materiali combustibili e dalla possibilità che essi possano effettivamente bruciare in base alla disponibilità di ossigeno. La velocità di pirolisi non è facile da determinare perché dipende, oltre che dalle caratteristiche del combustibile, anche dalle condizioni ambientali indotte dallo stesso incendio, in particolare dal flusso radiativo di ritorno proveniente dalle pareti e dai gas caldi. Per questo motivo, CFAST, come quasi tutti i programmi di simulazione a zone, non utilizza un reale modello di sviluppo della combustione, ma considera come "fuoco" un "bruciatore a gas" modulato, secondo le indicazioni fornite dall'utente, sia in termini di velocità di pirolisi, o di potenza termica rilasciata, sia in termini di quantità e qualità di specie chimiche rilasciate. Tuttavia CFAST è capace di determinare se la quantità presente dei gas di pirolisi può bruciare o meno in base alla effettiva presenza di ossigeno. Nel primo caso CFAST determina la potenza termica rilasciata moltiplicando la curva introdotta della velocità di pirolisi per il calore di combustione. Nel secondo caso, invece, CFAST determina la potenza termica in base alla reale disponibilità di ossigeno, e quindi modifica quella eventualmente fornita dall'utente [3]. In ogni caso, la curva del rilascio termico fornita come dato di input influenza pesantemente i risultati forniti dal programma di simulazione.

In un precedente lavoro [2], sono state analizzate le prestazioni fornite da CFAST quando come dato di input venga fornito l'andamento della velocità di pirolisi del combustibile presente all'interno dell'ambiente, ricavata da misure sperimentali durante lo sviluppo dell'incendio. Dai risultati ottenuti, appariva un sostanziale accordo tra gli andamenti delle temperature fornite dal modello e quelli delle temperature misurate, pur con qualche significativa differenza nei valori numerici. Nella realtà, però, il progettista non può disporre di dati sperimentali riguardanti la curva del tasso di rilascio termico nell'ambiente analizzato, per cui deve stimarla utilizzando gli algoritmi disponibili in letteratura. Di qui la necessità di analizzare il comportamento di CFAST in combinazione con gli algoritmi che consentono di valutare la potenza termica rilasciata durante l'incendio.

In fig. 2 è riportata un esempio di curva del tasso di rilascio termico determinata utilizzando alcuni algoritmi noti in letteratura [4].

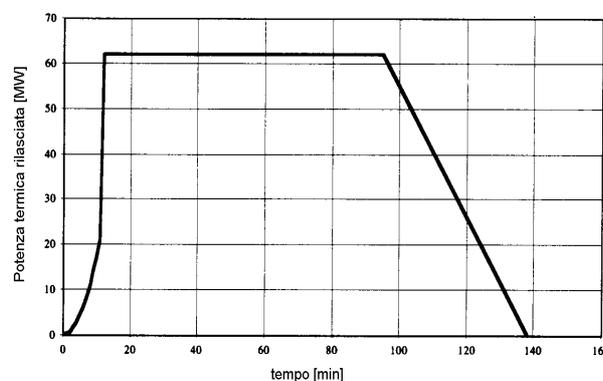


Fig. 2. Curva del tasso di rilascio termico costruita con algoritmi disponibili nella letteratura tecnica

Per quanto riguarda la fase di sviluppo preflashover, viene comunemente utilizzata una legge di crescita detta t-quadrato, in cui la potenza termica rilasciata cresce continuamente con legge quadratica del tempo t:

$$\dot{Q}_c = 1000 \cdot \left( \frac{t}{t_{1000}} \right)^2 \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

La costante  $t_{1000}$  rappresenta la velocità di crescita, essendo il tempo in secondi perché la potenza termica rilasciata raggiunga 1000 kW. La velocità di crescita dipende dal tipo di combustibile, dal carico di incendio esistente e dalle condizioni ambientali, tuttavia, in ambito civile si usa far riferimento a quattro velocità standard di crescita, indicate come lenta, media, veloce, ultraveloce, corrispondenti a valori di  $t_{1000}$  pari rispettivamente a 600 s, 300 s, 150 s e 75 s.

La legge di crescita t-quadrato è assunta valida fino all'istante in cui si verifica il flashover, che può essere determinato quando sia nota la potenza termica rilasciata in quel momento. A tale scopo è utile l'algoritmo di Thomas, che consente di valutare la potenza termica che deve essere rilasciata per produrre il flashover in un ambiente di assegnate dimensioni e condizioni di ventilazione:

$$\dot{Q}_{fo} = 7.8 \cdot A_{room} + 378 \cdot F_{veq} \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

dove  $A_{room}$  [m<sup>2</sup>] è l'area totale di tutte le superfici che delimitano l'ambiente, al netto delle aperture presenti, e  $F_{veq}$  [m<sup>5</sup>/2] è il fattore di ventilazione equivalente, pari alla somma dei fattori di ventilazione delle singole aperture, calcolabili come il prodotto dell'area dell'apertura per la radice quadrata dell'altezza.

Il flashover si verifica solo se le condizioni sono tali da permettere di raggiungere effettivamente il valore necessario della potenza termica rilasciata.

Ciò non accade se l'energia termica che dovrebbe essere rilasciata fino al prodursi del flashover supera l'80% dell'energia totale sviluppabile dal carico d'incendio, visto che l'energia rilasciata durante la fase di decadimento finale deve essere intorno al 20% circa, come risulta da molti dati sperimentali (ISO/TR 13387-2). In tal caso, dopo la fase crescente, limitata al rilascio dell'80% dell'energia totale, si verifica la fase di decadimento finale in cui viene rilasciato il rimanente 20% dell'energia termica.

Se, invece, si verificano le condizioni del flashover, l'andamento della potenza termica nella fase successiva è caratterizzato dal raggiungimento repentino del massimo valore di potenza termica rilasciata, che si mantiene costante finché non rimane da rilasciare la sola energia relativa al decadimento finale. Il valore massimo della potenza termica rilasciata può essere ricavato con l'algoritmo di Kawagoe in base alle condizioni di ventilazione esistenti nell'ambiente.

$$\dot{Q}_{max} = \eta_c \dot{m}_a \Delta H_{c,a} \quad (3)$$

dove  $\eta_c$  è l'efficienza di combustione,  $\dot{m}_a$  è la portata massica di aria entrante dalle aperture, valutabile pari a  $0.5 \cdot F_{veq}$  [kg/s], e  $\Delta H_{c,a}$  il calore sviluppato dal combustibile per kg di aria ossidante.

Il valore massimo della potenza termica rilasciata può essere calcolato anche utilizzando l'Eurocodice 1-ENV 1991-2-2 [5], che fornisce una espressione simile.

Infine, per caratterizzare la fase di decadimento finale, si assume che la potenza termica rilasciata decresca con legge lineare, fino all'istante in cui si libera il rimanente 20 % dell'energia termica totale.

### 3. APPLICAZIONE E RISULTATI

L'algoritmo esposto è stato utilizzato per simulare con CFAST alcuni eventi di incendio sperimentali realizzati in scala reale [1], e già simulati utilizzando come dato di input la curva della velocità di pirolisi dei materiali combustibili ricavata dalle stesse misure sperimentali [2].

La sperimentazione cui si fa riferimento è stata condotta all'interno di un edificio in costruzione nel comune di Bari, alto 12 piani con struttura portante in cemento armato. Gli eventi di incendio sono stati sperimentati nell'appartamento situato all'ottavo piano, con il focolare all'interno di una stanza in cui è presente una apertura verso l'esterno, costituita da una finestra a due ante, ognuna di larghezza 0.50 m e altezza 1 m, posta a 1.10 m dal pavimento.

Inoltre, la stanza comunica con gli altri ambienti dell'appartamento attraverso una porta, tenuta sempre aperta, di dimensioni 1.00 m x 2.20 m. Le pareti sono intonacate e realizzate con mattoni di laterizio di spessore 30 cm, se esterne, 8 cm se divisorie, e, per garantire un'adeguata protezione dal fuoco, sono state rivestite con pannelli di gesso di spessore 3 cm. I solai sono in latero-cemento e hanno uno spessore di 30 cm.

Come combustibile sono stati utilizzati due diversi tipi di poliuretano espanso, entrambi certificati di classe 1 IM nei confronti della resistenza al fuoco, un materiale molto utilizzato per le imbottiture di poltrone e divani. La massa di combustibile è stata fissata pari a 20 kg circa. Per il tipo 2 di poliuretano espanso è stato misurato sia il potere calorifico inferiore, che è risultato pari a 26 MJ/kg, sia la densità, pari a 32 kg/m<sup>3</sup>.

Con questi valori il carico d'incendio, espresso in kg di legna equivalente su metro quadrato di pavimento, risulta pari a 2.5 circa.

Per la simulazione in CFAST sono state scelte le prove di incendio n. 2, n. 4 e n. 11, che si differenziano tra loro per il solo grado di apertura della finestra presente nel vano focolare (Tab. 1), e che si produce in seguito a una diversa rottura dei vetri.

Tab. 1 – Dati delle prove sperimentali simulate con CFAST

N. prova	Finestra focolare [m <sup>2</sup> ]	Porta vano scala	Finestra ultimo piano	Combustibile
2	0.5	Aperta	Chiusa	Poliuretano cl. 1 IM - tipo 2
4	1.0	Aperta	Chiusa	Poliuretano cl. 1 IM - tipo 2
11	0.0	Aperta	Chiusa	Poliuretano cl. 1 IM - tipo 2

Nella simulazione con CFAST, la geometria degli ambienti interessati è stata semplificata, come già fatto in [2], considerando due soli compartimenti in comunicazione tra loro, mediante una apertura di altezza 2.2 m e larghezza 1.0 m, e con l'esterno, con una finestra di dimensioni variabili a seconda della prova simulata (Fig. 3).

Le proprietà termofisiche dei materiali e le condizioni ambientali richieste da CFAST [6], sono le stesse adottate in [2], a cui si rimanda.

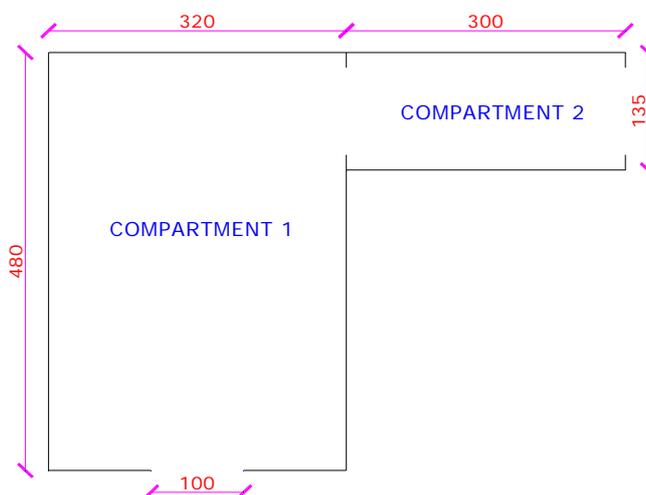


Fig. 3. Schema geometrico adottato nel modello CFAST

In considerazione del tipo di materiali combustibili presenti nel vano focolare, le curve del tasso di rilascio termico sono state costruite ipotizzando una velocità di crescita nella fase iniziale dell'incendio di tipo medio ( $t_{1000} = 300$  s); in queste condizioni, il flashover non si è verificato in nessuna delle tre prove analizzate, così come è effettivamente accaduto durante le prove sperimentali.

Nelle figg. 4, 5 e 6 sono riportati, rispettivamente gli andamenti temporali delle temperature nel vano focolare forniti da CFAST con la curva del tasso di rilascio termico ricavata con gli algoritmi analizzati, quelli forniti da CFAST sulla base della curva della velocità di pirolisi ricavata dai dati sperimentali e quelli misurati durante la sperimentazione.

I grafici relativi alle simulazioni eseguite con CFAST riportano sia la temperatura della zona superiore sia quella della zona inferiore. Infine, nei grafici la linea verticale rappresenta l'istante di apertura della finestra.

Nell'effettuare il confronto tra i risultati delle simulazioni e i dati sperimentali, è importante osservare che CFAST è un modello a due zone in ognuna delle quali la temperatura è assunta uniforme, con una variazione a gradino nel passaggio dall'una all'altra.

Invece, sperimentalmente le temperature sono misurate in un numero limitato di postazioni, in cui è possibile ritrovare notevoli differenze di valori non solo ad altezze differenti ma anche a parità di altezza. Pertanto, sarebbe opportuno disporre di misure sperimentali su una griglia tridimensionale molto dettagliata, in modo da poter stabilire dove considerare l'interfaccia di separazione tra le due zone e quindi determinare le loro temperature medie.

Nella sperimentazione a cui si fa riferimento in questo lavoro, la griglia tridimensionale dei punti di misura della temperatura all'interno del vano focolare era costituita solo da 18 termocoppie, disposte in tre piani orizzontali ognuno con 6 punti di misura; per questo motivo le temperature misurate sono state mediate solo all'interno dei piani orizzontali, ottenendo i grafici di Fig. 6.

Osservando le figure si rileva che i valori massimi raggiunti dalla temperatura nel vano focolare risultano più elevati nelle prove simulate con curva del tasso di rilascio termico teorica rispetto sia alle stesse prove simulate fornendo la curva della velocità di pirolisi ricavata dai dati sperimentali, sia rispetto alle prove sperimentali, pur con i limiti di confronto di cui è detto.

Inoltre, ad eccezione della prova n. 11, appare evidente una diversa evoluzione temporale della temperatura, caratterizzata, in particolare, da una velocità di decadimento finale molto più grande nel caso di simulazione con curva di rilascio termico teorica.

In effetti ciò è conseguenza della stessa elevata velocità con cui diminuisce la potenza termica rilasciata in questa fase, secondo quanto previsto dalla curva teorica.

La differenza tra la prova n. 11, che ha un comportamento migliore, e le prove n. 2 e n. 4 è che nella prima è assente la ventilazione dall'esterno, cosa invece presente nelle altre due prove a causa della rottura dei vetri nel vano focolare durante l'incendio stesso.

La variazione del grado di ventilazione durante l'incendio può modificare notevolmente la reale curva del tasso di rilascio termico sia perché l'ingresso di aria fredda può far diminuire significativamente la temperatura media nel vano focolare, e quindi la velocità di pirolisi del combustibile, sia perché produce un aumento dell'ossigeno presente, influenzando notevolmente l'evoluzione dell'incendio se è di tipo ventilation-controlled.

Gli algoritmi con cui si costruisce la curva del tasso di rilascio termico teorica possono mettere in conto le variazioni del grado di ventilazione solo se note a priori e non se provocate dallo stesso incendio, come accade nelle prove n. 2 e n. 4.

In ogni caso, da un'analisi degli algoritmi utilizzati, si può rilevare che quando per essi non si verifica il flashover, la curva del tasso di rilascio termico teorica finisce per non dipendere per nulla dal grado di ventilazione presente, ma solo dalla velocità fissata per la fase di crescita iniziale.

Tutto ciò può spiegare i diversi risultati forniti dal programma di simulazione nelle varie prove.

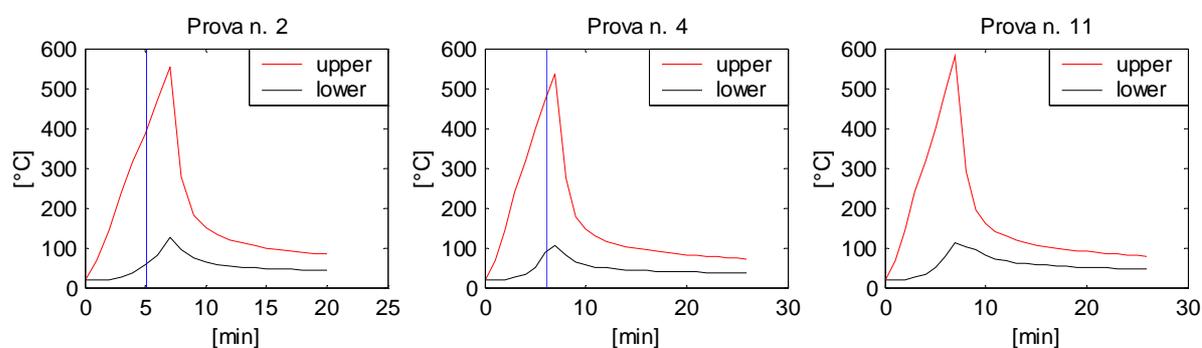


Fig. 4. Andamenti delle temperature nel vano focolare simulate con CFAST, fornendo la curva del tasso di rilascio termico teorica

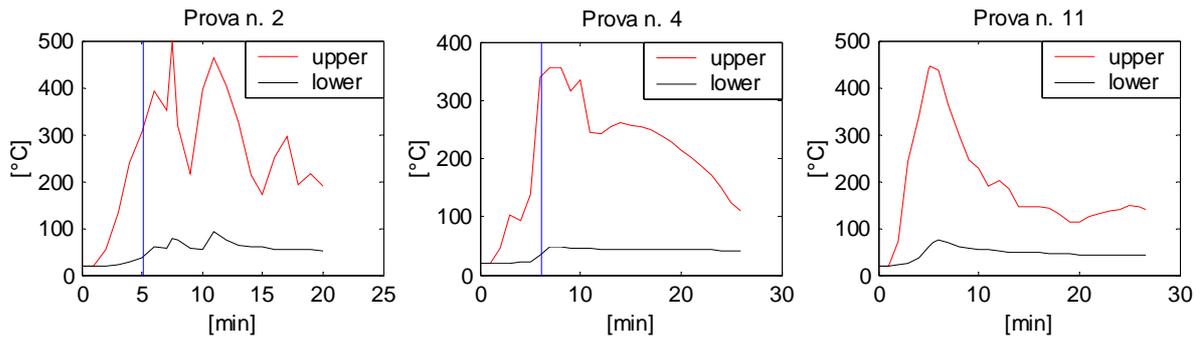


Fig. 5. Andamenti delle temperature nel vano focolare simulate con CFAST, fornendo la curva della velocità di pirolisi del combustibile ricavata dalle misure sperimentali

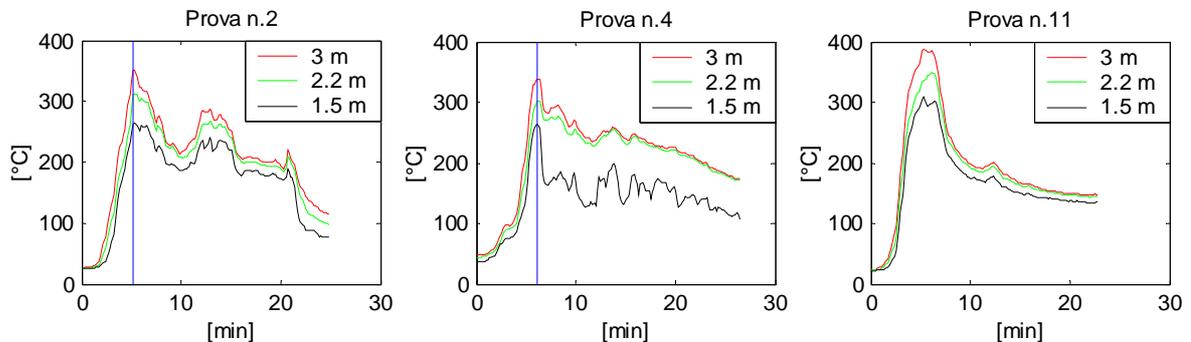


Fig. 6. Andamenti delle temperature nel vano focolare misurate durante le prove sperimentali

#### 4. CONCLUSIONI

Poiché il software di simulazione di incendi CFAST, come quasi tutti i modelli a zone, non dispone di un vero modello di combustione, richiede come dato di input la curva della potenza termica rilasciata durante l'incendio o la curva della velocità di pirolisi dei materiali combustibili.

Affinché il programma di simulazione possa fornire risultati aderenti alla realtà è necessario che la curva assegnata come dato di input sia fedele allo sviluppo reale dell'incendio.

Una corretta previsione di queste informazioni non sempre è agevole, tuttavia esistono alcuni algoritmi di semplice applicazione che consentono di costruire una curva del tasso di rilascio termico teorica in base al carico d'incendio esistente e al grado di ventilazione nell'ambiente.

I risultati forniti dal software CFAST sulla base di questi algoritmi sono stati confrontati sia con i valori di temperatura misurati durante una sperimentazione su scala reale, sia con i risultati forniti dallo stesso programma CFAST quando come dato di input venga fornita la curva della velocità di pirolisi del combustibile ricavata da misure sperimentali.

I risultati dell'analisi hanno permesso di evidenziare alcuni limiti degli algoritmi disponibili, per cui l'uso dei modelli di simulazione deve essere fatto con cautela scegliendo opportunamente i parametri che intervengono negli algoritmi, magari adottando criteri conservativi se l'applicazione è di tipo progettuale.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Ayr U., Buffo S., Cirillo E., Masini P., "Sperimentazione di eventi di incendio in un ambiente confinato", atti del Convegno Nazionale "Valutazione e Gestione del Rischio", Pisa, 15-17 ottobre 2002.
- [2] Ayr U., Decandia F., Masini P., Pappaletta L., Romano M., "Validazione sperimentale di un modellatore di incendi", atti del Convegno Nazionale "Sicurezza dei Sistemi Complessi", Bari, 16-17 ottobre 2003.

- [3] Jones W., Forney G., Peacock R., Reneke P., “*A Technical Reference for CFAST*”, NIST Technical Note 1431, April 2003.
- [4] Nuzzolese V., “*Fire Models for Buildings*”, OIKEMA S.r.l - Bari, 2002.
- [5] EC1, Eurocode 1: *Basis of design and design actions on structures. Part 2-2: Actions on structures exposed to fire*. ENV 1991-2-2, European Committee for Standardization, Brussels, 1994.
- [6] Peacock R., Reneke P., Jones W., Bukowski R., Forney G., “*A User guide for FAST*”, NIST Special Publication 921, January 2000.