

## **ANALISI DEL COMPORTAMENTO DI VERNICI INTUMESCENTI PER LA PROTEZIONE A FUOCO DELLE STRUTTURE IN ACCIAIO**

### **ANALYSIS OF THERMAL BEHAVIOR OF INTUMESCENT COATING FOR FIRE PROTECTING STEEL STRUCTURES**

Donatella de Silva, Antonio Bilotta, Emidio Nigro,  
Università di Napoli Federico II  
Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura  
Napoli, Italia  
donatella.desilva@unina.it, antonio.bilotta@unina.it, emidio.nigro@unina.it

#### **ABSTRACT**

In the last decades authorities acknowledged that fire safety may be achieved through analytical approaches which can describe how real fires behave and real buildings react. The steel construction industry, which has carried out most of the research to improve the fire safety of buildings through the application of the Fire Safety Engineering (FSE), clearly take advantage from these new approaches. The FSE is a discipline which uses detailed finite element (FE) modelling to predict the actual performance of structure and fire protection measures in a fire. The paper is aimed to improve the FE modelling of steel structures protected with intumescent coatings (IC). The results of about 50 lab scale tests in furnace are shown to investigate the effect of section factor, IC dry thickness, shape of the samples and input fire curves in order to define the thermal properties of an equivalent IC from the small-scale tests to be used to model real scale protected elements.

#### **SOMMARIO**

Negli ultimi decenni le autorità hanno riconosciuto che la sicurezza antincendio può essere raggiunta attraverso approcci analitici che sono in grado di descrivere come si evolvono gli incendi reali e come si comportano le strutture reali. L'industria delle costruzioni metalliche, che ha effettuato la maggior parte delle ricerche per migliorare la sicurezza antincendio degli edifici attraverso l'applicazione della Fire Safety Engineering (FSE), trae chiaramente beneficio da questi nuovi approcci. La FSE è una disciplina che utilizza modelli accurati agli elementi finiti (EF) per prevedere le reali prestazioni delle strutture in condizioni di incendio e delle misure di protezione antincendio. La memoria è finalizzata a migliorare la modellizzazione agli EF di strutture in acciaio protette da rivestimenti intumescenti (IC). I risultati di circa 50 test di scala di laboratorio nel forno sono mostrati per esaminare l'effetto del fattore di sezione, dello spessore a secco della IC, della forma dei campioni e delle curve di incendio di input, al fine di definire le proprietà termiche di una IC equivalente da test su piccola scala che può essere utilizzata per modellare gli elementi protetti in scala reale.

#### **1 INTRODUZIONE**

L'attuale quadro normativo italiano riguardante la valutazione della sicurezza antincendio trova un importante strumento in una "nuova disciplina" che si è affermata negli ultimi

decenni: la Fire Safety Engineering (FSE). Infatti, con l'emanazione del D.M. 03/08/2015 si è provveduto alla formalizzazione dell'uso dell'approccio prestazionale, introducendo un futuro in cui il sistema normativo di tipo verticale lascerà il posto ad un insieme di soluzioni tecniche flessibili ed aderenti alle specifiche esigenze delle diverse attività. Tale approccio tende ad ottimizzare le capacità della struttura di resistere al fuoco perché consente di tener conto di sovra-resistenze legate allo schema statico della struttura. Poiché le caratteristiche meccaniche dell'acciaio diminuiscono con l'aumentare della temperatura per mantenere la temperatura negli elementi strutturali al di sotto della temperatura critica cui corrisponde il collasso, è necessario ricorrere a protettivi. Tra i protettivi più comuni per le strutture in acciaio ci sono le vernici intumescenti (IC) che nella seconda metà del secolo scorso hanno vissuto un'intensa fase di sviluppo [1]. Per introdurre questi protettivi nell'applicazione dell'approccio prestazionale con modellazioni numeriche avanzate della struttura, è necessario conoscere le caratteristiche termiche della IC, generalmente non disponibili. Nel seguito si mostrano alcuni risultati di una campagna sperimentale su piastre in acciaio con differenti fattori di sezione e di differente forma, protette con vernici di differenti spessori e riscaldati con due curve nominali di incendio (ISO834 e Smouldering), con lo scopo di caratterizzare il comportamento della IC e definire i parametri di una IC equivalente da introdurre in software di calcolo avanzato.

## 2 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Le prove sono state eseguite in un forno di dimensioni 1x1x1 m. Sulla faccia frontale del forno è stata creata un'apertura per osservare meglio durante le prove (Fig. 1) senza inficiare la stabilità del riscaldamento del forno stesso. Ogni prova è stata fermata quando la temperatura media all'interno del provino raggiungeva i 700°C.

I provini testati con la curva ISO834 consistono in 24 piastre in acciaio di dimensioni 300x300 mm con differenti spessori con lo scopo di ottenere differenti fattori di sezione e 12 piastre di differenti misure (60x60x5, 75x75x10, 135x135x20) con diversa esposizione al fuoco, per ottenere lo stesso fattore di sezione dei primi 24 provini, ma con forma differente (Tabella 1 e Fig. 2.). Inoltre sono state condotte altre 12 prove con la curva di incendio smouldering.

Le superfici esposte dei provini sono state protette con differenti spessori  $d_{IC}$  di una IC commerciale a base d'acqua. Sono stati testati anche provini senza protettivo. I parametri investigati sono sintetizzati in Tabella 1, mentre per i dettagli del setup (Fig. 2) si rimanda a [5]. Di fronte all'apertura del forno è stata posizionata una fotocamera per scattare fotografie con un intervallo di 5 secondi servite a calibrare la variazione di spessore della vernice attraverso la tecnica del *Digital Image Correlation* (DIC).

**Tabella 1.** Matrice delle prove

Samples	n°	ID	Dimension (mm)	A/V (m <sup>2</sup> )	IC (µm)	Input Curve
8 plates 300x300x4	1	S_300x300x4-250_500_ISO_1	300x300x4	250	500	ISO834
	2	S_300x300x4-250_500_ISO_2			500	
	3	S_300x300x4-20_1000_ISO_1			1000	
	4	S_300x300x4-250_1000_ISO_2			1000	
	5	S_300x300x4-250_1500_ISO_1			1500	
	6	S_300x300x4-250_1500_ISO_2			1500	
	7	S_300x300x4-250_2000_ISO_1			2000	
	8	S_300x300x4-250_2000_ISO_2			2000	
8 plates 300x300x8	9	S_300x300x8-150_500_ISO_1	300x300x8	125	500	ISO834
	10	S_300x300x8-150_500_ISO_2			500	
	11	S_300x300x8-150_1000_ISO_1			1000	
	12	S_300x300x8-150_1000_ISO_2			1000	
	13	S_300x300x8-150_1500_ISO_1			1500	
	14	S_300x300x8-150_1500_ISO_2			1500	
	15	S_300x300x8-150_2000_ISO_1			2000	
	16	S_300x300x8-150_2000_ISO_2			2000	
8 plates 300x300x15	17	S_300x300x15-80_500_ISO_1	300x300x15	67	500	ISO834
	18	S_300x300x15-80_500_ISO_2			500	
	19	S_300x300x15-80_1000_ISO_1			1000	
	20	S_300x300x15-80_1000_ISO_2			1000	
	21	S_300x300x15-80_1500_ISO_1			1500	
	22	S_300x300x15-80_1500_ISO_2			1500	
	23	S_300x300x15-80_2000_ISO_1			2000	
	24	S_300x300x15-80_2000_ISO_2			2000	
4 plates 60x60x5	25	S_60x60x5-250_500_ISO_1	60x60x5	250	500	ISO834
	26	S_60x60x5-250_500_ISO_2			500	
	27	S_60x60x5-250_1500_ISO_1			1500	
	28	S_60x60x5-250_1500_ISO_2			1500	
4 plates 75x75x10	29	S_75x75x10-125_500_ISO_1	75x75x10	125	500	ISO834
	30	S_75x75x10-125_500_ISO_2			500	
	31	S_75x75x10-125_1500_ISO_1			1500	
	32	S_75x75x10-125_1500_ISO_2			1500	
4 plates 135x135x20	33	S_135x135x20-67_500_ISO_1	135x135x20	67	500	ISO834
	34	S_135x135x20-67_500_ISO_2			500	
	35	S_135x135x20-67_1500_ISO_1			1500	
	36	S_135x135x20-67_1500_ISO_2			1500	
4 plates 300x300x4	37	S_300x300x4-250_500_SM_1	300x300x4	250	500	SMOULDERING
	38	S_300x300x4-250_1000_SM_1			1000	
	39	S_300x300x4-250_1500_SM_1			1500	
	40	S_300x300x4-250_2000_SM_1			2000	
4 plates 300x300x8	41	S_300x300x8-125_500_SM_1	300x300x8	125	500	SMOULDERING
	42	S_300x300x8-125_1000_SM_1			1000	
	43	S_300x300x8-125_1500_SM_1			1500	
	44	S_300x300x8-125_2000_SM_1			2000	
4 plates 300x300x15	45	S_300x300x15-67_500_SM_1	300x300x15	67	500	SMOULDERING
	46	S_300x300x15-67_1000_SM_1			1000	
	47	S_300x300x15-67_1500_SM_1			1500	
	48	S_300x300x15-67_2000_SM_1			2000	



Fig. 1. Forno

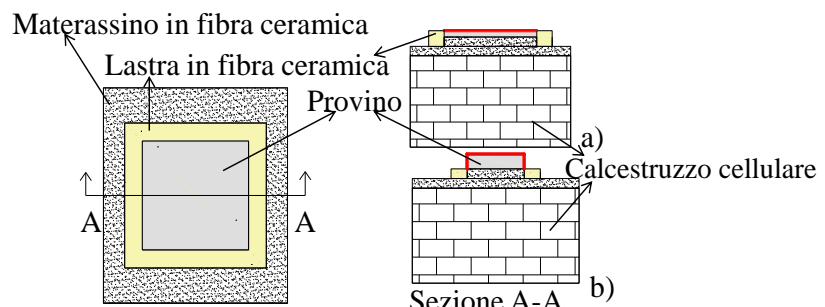


Fig. 2. Setup e sez. A-A: (a) provini "grandi", (b) provini "piccoli"

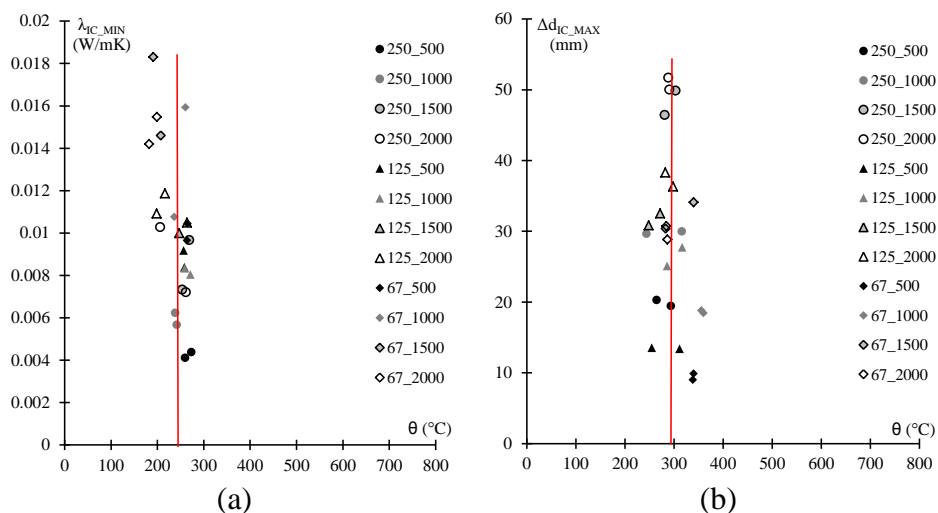
### 3 RISULTATI

La schiuma intumescente isola l'elemento grazie alla sua bassa conducibilità termica. Mentre le temperature registrate all'interno delle piastre sono state già discusse in [5], di seguito si

procede a valutare la conducibilità termica “equivalente” della IC,  $\lambda_{IC}$ , o conducibilità termica specifica,  $\lambda/d_{IC}$  e la loro correlazione con la variazione di spessore della vernice  $\Delta d_{IC}$ .

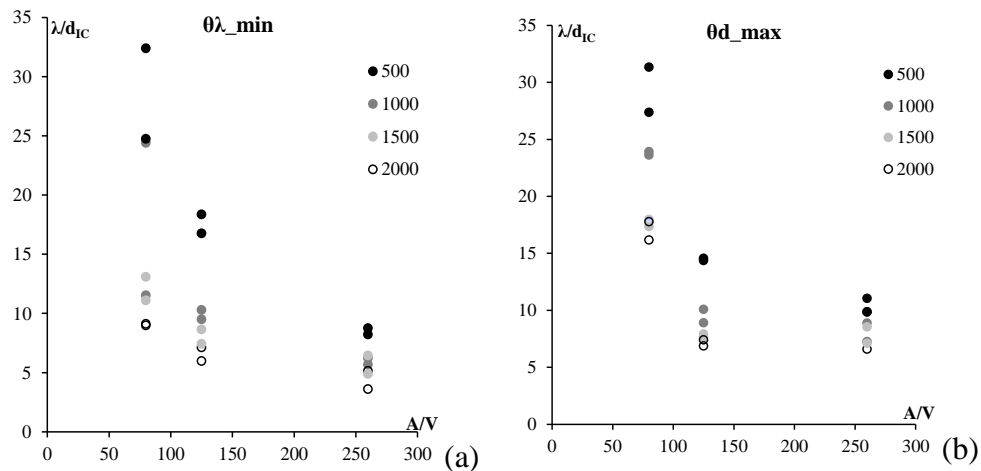
### 3.1 Conducibilità termica equivalente e variazione di spessore

La conducibilità termica equivalente delle IC può essere calcolata attraverso il metodo della “ $\lambda$  variabile” contenuto dell’Eurocodice [4]. Questo metodo si basa su un bilancio di energia in un fissato intervallo di tempo di riscaldamento in condizioni di flusso monodirezionale. Il metodo ipotizza una condizione adiabatica tra i gas provenienti dal forno e la superficie della schiuma intumescente. Per tali ragioni questa formula può essere applicata, in questo caso, unicamente ai provini esposti solo dall’alto [5].



**Fig. 3.** (a) minima conducibilità equivalente e (b) massima espansione ( $\Delta d_{IC\_MAX}$ )

Nella maggior parte dei casi [6], durante la prova sperimentale, la conducibilità termica equivalente raggiunge un valore minimo ( $\lambda_{IC\_min}$ ) ad una certa temperatura  $\theta_{\lambda\_min}$ , dopodiché inizia a salire fino a circa 700 °C. La Fig. 3a mostra che la temperatura  $\theta_{\lambda\_min}$  a cui si raggiunge il minimo valore della conducibilità termica equivalente è lo stesso per la maggior parte dei campioni (circa 240 °C). La Fig. 3b mostra che il massimo rigonfiamento è osservato per la maggior parte dei campioni a circa 300°C. La differenza tra  $\theta_{\lambda\_min}$  e  $\theta_{d\_max}$  è dovuta al fatto che la reazione di intumescenza è endotermica. La Fig. 4 mostra che sia  $\theta_{\lambda\_min}$  che  $\theta_{d\_max}$  dipendono dal fattore di sezione: più grande è il fattore di sezione, più piccola è la conducibilità termica specifica. Il comportamento dei provino con 500  $\mu$ m non è stabile, così come già mostrato in [5] e [6].



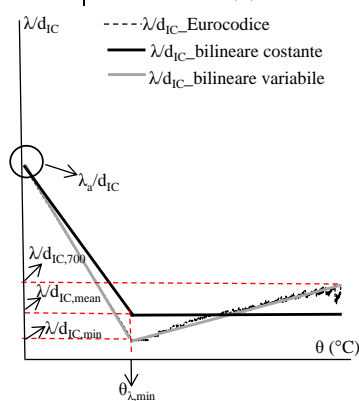
**Fig. 4.** (a) Variazione della conducibilità termica specifica a  $\theta_{\lambda_{\min}}$  e (b) a  $\theta_{d_{\max}}$

### 3.2 Risultati e modellazione agli elementi finiti

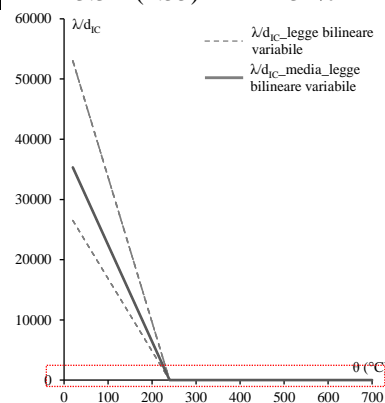
La conducibilità termica equivalente della IC è utile per la modellazione di tale protettivo con modelli di calcolo avanzati. La Fig.5 mostra un andamento bilineare della conducibilità termica: a 20°C il valore è assunto pari a quello dell'acciaio. Nella legge variabile, il secondo punto è il minimo valore della conducibilità termica e il terzo è il valore a 700°C. Nella legge costante, invece, è stato considerato il valore medio della conducibilità termica specifica ( $\lambda/d_{IC\text{mean}}$ ) tra  $\theta_{\lambda_{\min}}$  e 700 °C. Poiché il minimo valore di conducibilità termica è raggiunto ad una temperatura simile per la maggior parte di provini (Fig. 4a) è stato considerato il valore medio della temperatura  $\theta_{\lambda_{\min}}=241^{\circ}\text{C}$ , per identificare una legge media. I provini con spessore 500 $\mu\text{m}$  non sono stati considerati in quanto non stabili per questa tipologia di IC [5]. La tabella 2 contiene la media dei parametri ottenuti dai risultati delle prove sperimentali, la deviazione standard tra parentesi e il coefficiente di variazione, CoV. Per la legge bilineare variabile il CoV è grande sia a 241°C che a 700°C, per la legge bilineare costante il CoV si riduce. La Fig. 6 mostra i valori di conducibilità termica specifica a 20 °C. Le differenze tra le leggi costante bilineare e variabile bilineare sono apprezzabili in Fig. 7.

**Tabella 2:** Conducibilità termica equivalente

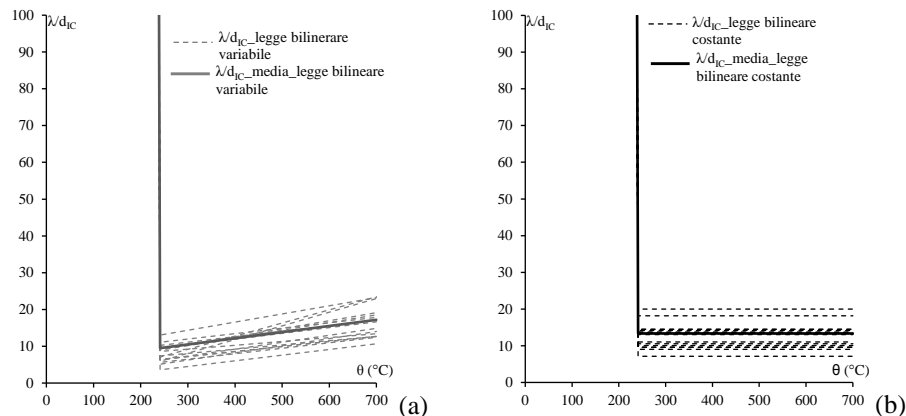
T [°C]	Legge variabile		Legge costante	
	$\lambda/d_{IC\text{mean}}$ [W/m <sup>2</sup> K]	CoV	$\lambda/d_{IC\text{mean}}$ [W/m <sup>2</sup> K]	CoV
20	3533	-	3533	-
241	9.5 (5.9)	62%	13.3 (4.55)	34%
700	17.1 (5)	29%	13.3 (4.55)	34%



**Fig. 5.** Leggi semplificate bilineari per  $\lambda/d_{IC}$



**Fig. 6.** Leggi semplificate bilineari: valori a 20°C



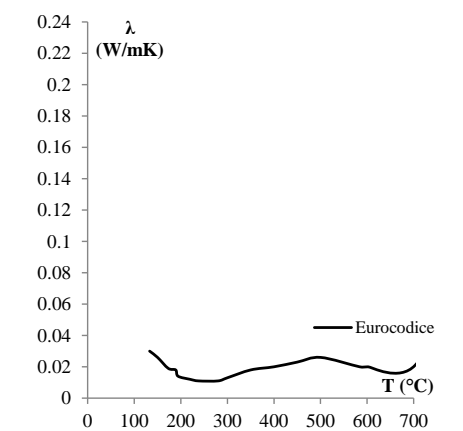
**Fig. 7.** Leggi bilineari per la conducibilità termica specifica (a) variabile, (b) costante

### 3.1.1 Risultati delle leggi bilineari variabile e costante

I valori della conducibilità termica equivalente sono stati usati per modellare le piastre protette con il software SAFIR16 [7]. Sono state usate tre differenti leggi di variazione della conducibilità termica: quella calibrata direttamente con la formula dell'Eurocodice (metodo  $\lambda$  variabile) (Fig.8) e quelle calibrate con le leggi bilineari variabile e costante. La Fig. 9a mostra che, sebbene la curva che fitta meglio i valori sperimentali sia quella della conducibilità derivante dal “metodo  $\lambda$  variabile”, anche i valori ottenuti con bilineare variabile sono in buon accordo con i risultati sperimentali. Con la bilineare costante invece si ottengono valori più alti di temperatura. Inoltre anche la media dei valori delle conducibilità termiche di tutti i provini con le leggi bilineari è stata usata per le analisi agli elementi finiti: i risultati sono mostrati in Fig. 9b. In questo ultimo caso la differenza è maggiore.

### 3.2.1 Confronto tra campioni “piccoli” e “grandi”

La Fig. 10 mostra un confronto tra provini “grandi” (dal no.1 al no.24) e i provini “piccoli” (dal no.25 al no.36) con lo stesso fattore di sezione. Per i provini “grandi” sono state eseguite analisi 2D, mentre per i provini “piccoli” è stato necessario eseguire analisi 3D in quanto anche la superficie laterale era esposta.



**Fig. 8.** Conducibilità “metodo  $\lambda$  variabile”

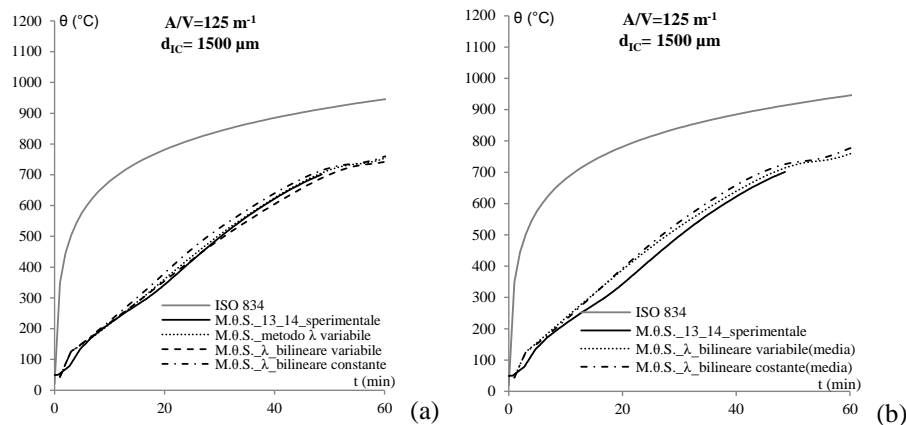
**Tabella 3:** Leggi bilineari

variabile		costante	
20	53.33	20	53.33
173	0.03	173	0.03
238	0.012	238	0.016
700	0.025	700	0.016
1200	0.2	1200	0.2

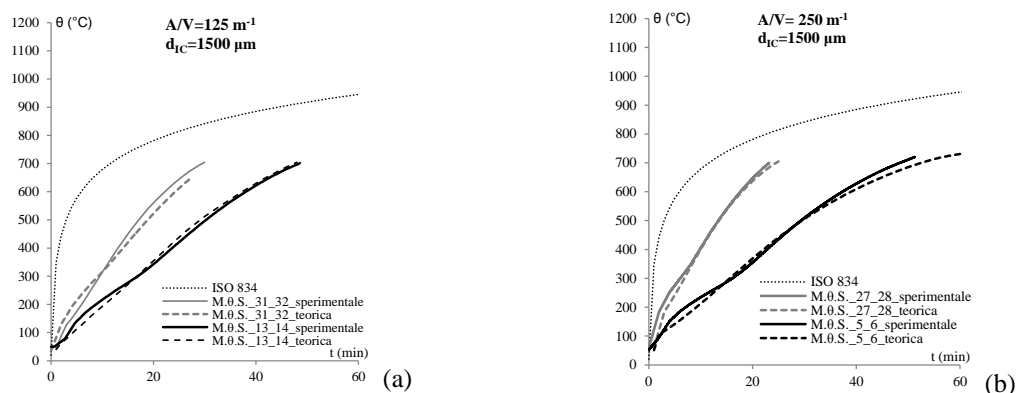
**Tabella 4:** Leggi bilineari (media di tutti i provini)

variabile		costante	
20	53.33	20	53.33
173	0.03	173	0.03
238	0.015	238	0.02
700	0.027	700	0.02
1200	0.2	1200	0.2





**Fig. 9.** Temperature con conducibilità termica equivalente (a) leggi bilineari (b) leggi bilineari medie



**Fig. 10.** Temperature provini “grandi” e “piccoli” con  $d_{IC}$  1500  $\mu\text{m}$ : (a)  $A/V$  125  $\text{m}^{-1}$ , (b) 250  $\text{m}^{-1}$

Sebbene tra i provini 13\_14 e 31\_32, 5\_6 e 27\_28 il fattore di sezione e lo spessore di vernice siano gli stessi, il comportamento è differente. Le temperature sono diverse poiché l'IC non ha reagito sulla zona laterale esposta dei provini “piccoli”. Ciò è confermato anche confrontando le temperature dei provini “piccoli” e “grandi” senza protettivo (Fig. 10b) che sono le stesse, quindi non c'è alcun effetto della forma del provino. Poiché la conducibilità termica può essere calibrata in accordo con l'Eurocodice solo per i provini “grandi” (si veda par.2.1), nel modello teorico la conducibilità calibrata sui provini “grandi” è stata usata per modellare anche i provini “piccoli”.

#### 4 CONCLUSIONI

La memoria mostra la rielaborazione di risultati di prove sperimentali finalizzata alla caratterizzazione delle proprietà termiche di una vernice intumescente a base di acqua. La conducibilità termica equivalente dipende sia dallo spessore iniziale che dal fattore di sezione, ma sembra non dipende dalla forma del provino. Le temperature a cui si raggiungono il minimo valore di conducibilità termica ed il massimo rigonfiamento della vernice sono molto simili per la maggior parte dei provini. Le analisi numeriche agli elementi finiti eseguite con conducibilità calibrate con leggi differenti mostrano la possibilità di applicare una legge semplificata bilineare al posto di quella accurata. Infine, la conducibilità termica equivalente calibrata sui provini “grandi”, per i quali sono verificate le condizioni di flusso monodirezionale, consente di modellare il comportamento dei provini “piccoli”, sulle cui superfici laterali la vernice intumescente non ha reagito bene. In futuro si prevede di eseguire test su provini con altri fattori di sezione ed altre curve di temperatura in cono calorimetrico per studiare il comportamento della vernice con diversi flussi di calore.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'azienda J.F. AMONN SPA per aver fornito i materiali ed il supporto dei sigg. Giovanni Nava e Mauro Banfi durante le prove sperimentali.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Staggs, J., Crewe.R., and Butler. R., A., (2012) Theoretical and experimental investigation of intumescent behaviour in protective coatings for structural steel. *Chemical Engineering Science*, 71, 2012, pp.239-251.
- [2] Butler, K.M., Baum, H.R. and Kashiwagi, T., (1997) Three-dimensional modeling of intumescent behaviour in fires. *Fire Safety Science - Proceedings of the Fifth International Symposium, International Association for Fire Safety Science*, pp.532-534.
- [3] J. Kolšek, P. Češarek, (2015). Performance-based fire modelling of intumescent painted steel structures and comparison to EC3. *Journal of Constructional Steel Research* 104 pp.91-103.
- [4] EN 13381-8-June 2013-Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied reactive protection to steel members.
- [5] de Silva D., Bilotta A. & Nigro E., (2016). Experimental tests on intumescent coating for protecting steel structures. *Structures in Fire (SIF'16)*, p. 1081-1089. Princeton, USA.
- [6] de Silva D., Bilotta A., Nigro E., Experimental analysis on the effectiveness of intumescent coatings in fire. *IFireSS 2017-2nd International Fire Safety Symposium* Naples, Italy, June 7-9, 2017
- [7] Franssen J.-M.: SAFIR. A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire. *Engineering Journal, A.I.S.C.*, Vol 42, No. 3 (2005), 143-158.

## PAROLE CHIAVE

Sicurezza antincendio, vernici intumescenti, approccio prestazionale, modelli numerici avanzati

*Il presente articolo è tratto dagli atti del XXVI CONGRESSO C.T.A., VENEZIA 28-30 SETTEMBRE 2017.*