

Comportamento al fuoco delle lastre *predalle* da solaio: approfondimenti e raccomandazioni

DI A. FRANCHI

Ogni anno in Italia vengono realizzati circa 10 milioni di m² di solai in c.a. alleggeriti con polistirene che, sebbene siano dichiarati resistenti al fuoco, risultano privi degli opportuni sfoghi. L'assenza di sfoghi, in caso di incendio, può dar luogo a gravi fenomeni di rottura esplosiva di parti di calcestruzzo con perdita prematura del requisito di tenuta e portanza. Tale situazione è causa di una forte riduzione della sicurezza della struttura che quindi viene a trovarsi in uno stato di inevitabile pericolo.

Tra i criteri di sicurezza antincendio che progettisti, collaudatori e costruttori devono applicare nella progettazione e realizzazione di fabbricati, attenzione prioritaria deve essere rivolta alla valutazione e al controllo del comportamento al fuoco delle strutture portanti, sia rispetto alla protezione e allo sgombero delle persone coinvolte in un incendio che, e non meno importante, per l'incolumità dei soccorritori che si trovano a dover intervenire sul luogo.

Nel complesso, la sicurezza del sistema costruttivo, in caso di incendio, dipende dal suo comportamento al fuoco, caratterizzato dalla "reazione al fuoco" dei singoli materiali da costruzione e dalla "resistenza al fuoco" della struttura stessa. In particolare, per *reazione al fuoco* di un materiale (D.M. 26/6/1964: "Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi") si intende: "... il grado di partecipazione di un materiale combustibile al fuoco al quale è sottoposto. In relazione a ciò, i materiali sono assegnati alle classi 0, 1, 2, 3, 4, 5 con l'aumentare della loro partecipazione alla combustione; quelli di classe 0 non sono combustibili". La *resistenza al fuoco* (D.M. 16/02/2007: "Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione"), rappresentata dalle classi di resistenza al fuoco, si basa sulla garanzia di durata nel tempo di prestazioni e funzioni dei prodotti e manufatti da costruzione (tab. I) in caso di incendio. Tali classi vengono espresse in minuti - 10 classi di resistenza all'incendio: 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 e 360 min - a meno che non sia indicato altrimenti.

In Italia, a differenza degli altri Paesi europei, è molto diffuso l'impiego di manufatti prefabbricati alleggeriti con polistirene, anche in edifici che devono avere caratteristiche REI elevate. Questa soluzione, adottata per alleggerire il peso delle strutture dei manufatti (viene, infatti, utilizzata estensivamente per la realizzazione di lastre tralicciate *predalle* e pannelli di tamponamento), può portare però a situazioni di grave pericolo, qualora i manufatti alleggeriti siano stati progettati e realizzati senza tenere conto sia delle norme vigenti che del comportamento degli edifici negli incendi reali.

Il D.M. 09/03/2007 ha abolito definitivamente la nota Circolare 91/61, utilizzata per molti anni dai produttori per certificare una resistenza al fuoco inesistente nei loro manufatti prefabbricati in c.a. o c.a.p. Riprendendo il D.M. del 04/05/1998 ("Disposizioni relative alle modalità di presentazione ed al contenuto delle domande per l'avvio dei procedimenti di prevenzione incendi, nonché all'uniformità dei connessi servizi resi dai Comandi provinciali dei vigili del fuoco"), il successivo D.M. 16/02/2007 riconferma la validità della norma UNI 9502/2001 quale metodo per il calcolo analitico o tabellare delle strutture in c.a. e c.a.p., fintanto che non saranno pubblicate le appendici nazionali degli Eurocodici.

In proposito, la norma UNI 9502/2001 richiama l'attenzione dei progettisti ad un impiego accorto del polistirene come alleggerimento. In particolare, l'art. 7.2.2 stabilisce che "*Nel caso di elementi che inglobino materiali che alle alte temperature diventano gas, occorre predisporre opportuni sfoghi, in direzione della faccia esposta al fuoco, per evitare che la tenuta venga compromessa da esplosioni*". Come anticipato, questo concetto è stato riportato anche nel D.M. 16/02/2007 dove, nell'Allegato D, si stabilisce, per i solai a lastre con alleggerimento in polistirene o materiali affini, di prevedere opportuni sfoghi delle sovrappressioni (tab. II).

In merito a queste considerazioni, un'ulteriore autorevole e significativa valutazione sul comportamento al fuoco di lastre da solaio in polistirene (Circolare del Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del soccorso pubblico e della difesa civile con PROT. n° P567/4122 sott. 55 del 9 giugno 2005 - fig. 1) sottolinea la pericolosità di scoppio delle parti strutturali a causa del forte aumento di pressione, esercitato dai gas di combustione del materiale di alleggerimento chiuso

Tab. I - Simboli delle prestazioni di resistenza al fuoco (allegato A del DM 16.2.07).

Simbolo	Prestazioni e funzioni dei prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione
R	Capacità portante
E	Tenuta
I	Isolamento
W	Irraggiamento
M	Azione meccanica
C	Dispositivo automatico di chiusura
S	Tenuta al fumo
P o PH	Continuità di corrente o capacità di segnalazione
G	Resistenza all'incendio della fuliggine
K	Capacità di protezione al fuoco
D	Durata della stabilità a temperatura costante
DH	Durata della stabilità lungo la curva standard tempo-temperatura
F	Funzionalità degli evacuatori motorizzati di fumo e calore
B	Funzionalità degli evacuatori naturali di fumo e calore

Tab. II - Valori minimi (mm) dello spessore totale "H" di solette e solai e della distanza "a" dall'asse delle armature alla superficie esposta, che garantiscono il requisito di capacità portante R (allegato D del DM 16.2.07).

Classe	30	60	90	120	180	240
Solette piene con armatura monodirezionale						
Solai misti di lamiera di acciaio con riempimento di calcestruzzo (1)	H = 80/a = 10	120/20	120/30	160/40	200/55	240/65
Solai a travetti con alleggerimento (2)	H = 160/a = 15	200/30	240/35	240/45	300/60	300/75
Solai a lastra con alleggerimento (3)						

I valori di "a" devono essere non inferiori ai minimi di regolamento per le opere di c.a. e c.a.p.
 In caso di armatura pre-tesa aumentare i valori di "a" di 15 mm. In presenza di intonaco i valori di "H" e "a" ne devono tener conto nella seguente maniera:

- 10 mm di intonaco normale (*come definito in tab. III) equivale a 10 mm di calcestruzzo;
- 10 mm di intonaco protettivo antincendio (**come definito in tab. III) equivale a 20 mm di calcestruzzo.

Per ricoprimenti di calcestruzzo > 50 mm prevedere un'armatura diffusa aggiuntiva che assicuri la stabilità del ricoprimento.
 (1) In caso di lamiera grecata, "H" rappresenta lo spessore medio della soletta. Il valore di "a" non comprende lo spessore della lamiera. La lamiera ha unicamente funzione di cassero. In caso contrario, questa va protetta secondo quanto indicato per le strutture portanti in acciaio (vedere allegato D al decreto: D.7 *Travi, tiranti e colonne in acciaio*).
 (2) Deve essere presente uno stato di intonaco normale di spessore non inferiore a 20 mm ovvero di intonaco isolante di spessore non inferiore a 10 mm.
 (3) In caso di alleggerimento in polistirene o materiali affini prevedere sfoghi delle sovrappressioni.

tra soletta e soletta superiore. È la tenuta, ossia la capacità di un elemento da costruzione di non lasciar passare (ne tanto meno produrre) fiamme, vapori o gas caldi dal lato esposto a quello non esposto, ad essere potenzialmente compromessa, durante l'incendio, quando prodotti come il polistirene vengono impiegati per l'alleggerimento dei solai o per la coibentazione delle pareti privi di opportuni sfoghi.

APPROCCIO ANALITICO

Un incendio reale è un evento di difficile descrizione matematica, stante la sua complessità fisica e la

presenza di svariati fattori aleatori che condizionano e concorrono all'evoluzione dello stesso. Un elemento strutturale sottoposto ad un incendio viene esposto a temperature molto elevate fin dai primi minuti. Con riferimento all'incendio convenzionale citato nella norma UNI 9502, l'andamento della temperatura con il variare del tempo è espresso dalla formula seguente:

$$T = 20 + 345 \cdot \log_{10} (8 \cdot t + 1) \text{ } ^\circ\text{C} \quad [1]$$

dove "T" è la temperatura in gradi centigradi e "t" il tempo in minuti di sviluppo dell'incendio.

Tab. III - Valori di temperatura all'interno dell'elemento per il tempo di esposizione al fuoco: sezioni di solette piane di spessore $s = 30$ cm, con "a" uguale alla distanza dell'asse della barra di acciaio dalla più vicina superficie esposta al fuoco (UNI 9502:2001 "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso").



a (cm)	Tempo di esposizione al fuoco t (min)					
	30	60	90	120	180	240
Temperatura (°C)						
0	661	824	907	963	1039	1 092
1	482	661	758	824	914	977
2	326	490	595	669	770	840
3	222	370	466	541	648	723
3,5	191	325	415	486	594	671
4	161	286	372	439	544	622
4,5	135	252	334	398	498	577
5	114	223	301	362	458	534
6	82	175	246	302	390	460
7	60	138	202	254	335	399
8	45	109	166	213	289	350
9	35	86	136	180	251	308
10	29	69	112	152	218	271

Fin dai primi minuti dall'inizio dell'incendio, l'aria inglobata nel polistirene si riscalda progressivamente con il passare del tempo: è noto che qualsiasi gas racchiuso in un volume fisso aumenta di pressione con l'aumentare della temperatura (si pensi ai pneumatici d'estate).

Una definizione matematica abbastanza semplice, ma che comunque può fornire indicazioni di massima di questo fenomeno, è la nota *equazione di stato dei gas*:

$$P V = n R T \quad [2]$$

dove, per un gas perfetto, si ha:

P = pressione del gas

V = volume del gas

n = numero legato al quantitativo di molecole del gas

R = costante dei gas (8.314 J/mol K)

T = temperatura assoluta del gas (Kelvin).

Si nota immediatamente che, nel caso in esame, essendo V, n ed R dei valori costanti, si ha necessariamente che:

$$P/T = \text{costante} \quad [3]$$

ovvero, se la temperatura del gas aumenta, anche la pressione del gas aumenta della stessa quantità al fine di conservare costante il loro rapporto.

Le temperature assolute dei gas (esprese in gradi Kelvin) si ottengono sommando 273 alle temperature in gradi Celsius: pertanto 20°C (temperatura ambiente) corrispondono a 293 K. Come evidenziato, dopo 30 minuti la temperatura dell'aria nelle camere che si sono formate con la sublimazione dei parallelepipedi in polistirene è di 114°C ossia 387 K. Per la formula [3], la temperatura dell'aria è aumentata del 32% (387 K/293 K) e, conseguentemente, anche la sua



Fig. 2 - Vuoto creato dalla sublimazione del blocco in PSE durante l'incendio.

pressione è aumentata del 32%; ciò significa che, dopo 30 minuti, l'aria del polistirene sublimato esercita una pressione di 0,32 atm, ossia 32 kN/m²: un valore molto elevato e, sicuramente, non sopportabile dalla lastra *predalle*. Da qui l'esplosione (fig. 3).

APPROCCIO SPERIMENTALE

Allo scopo di verificare l'entità di questo fenomeno esplosivo, Assobeton (tramite Abes s.r.l.) e Ruredil s.p.a. hanno finanziato una indagine sperimentale su una lastra tralicciata tipo *predalle*, in parte piena



Fig. 3 - Foto di pannelli e solai prefabbricati in c.a. alleggeriti con blocchi in polistirene (PSE) privi di sfoghi: risultato delle esplosioni causate da incendi reali.

ed in parte alleggerita sia con blocchi in PSE che con blocchi da solaio in laterizio. In particolare, l'obiettivo della prova è stato quello di dare una risposta alle seguenti domande:

1. i calcoli analitici svolti secondo la UNI 9502/2001 sono validi anche per manufatti alleggeriti?
2. I manufatti con alleggerimenti possono essere considerati resistenti al fuoco?
3. Gli alleggerimenti con PSE e blocchi in laterizio possono essere utilizzati in manufatti resistenti al fuoco?

Il solaio di prova, progettato per una resistenza al fuoco R120, è stato suddiviso in quattro quadranti: uno senza alleggerimenti, uno alleggerito con blocchi per solaio in laterizio, uno con blocchi in polistirene (PSE) ed uno con blocchi in PSE nei quali erano stati però inseriti degli sfiati in materiale plastico forniti da Ruredil s.p.a (figg. 4 e 6). Dopo la posa degli alleggerimenti, la lastra è stata completata con un getto di calcestruzzo C25/30 MPa e lasciata maturare per 3 mesi a temperatura ambiente.

L'elemento di solaio oggetto della sperimentazione è stato testato presso il laboratorio CSI di Bollate (MI) in un forno di prova con riferimento alla curva tempo-temperatura di fig. 5. Dopo soli 20 minuti dall'inizio della prova, il calcestruzzo in corrispondenza dell'alleggerimento in PSE, privo di sfiati di sicurezza, è esploso e la temperatura della termocoppia posta sull'armatura è salita da 200 a 800°C, quasi istantaneamente.

Gli alleggerimenti in laterizio e in PSE, quest'ultimi dotati di sfiati di sicurezza, invece, non hanno provocato esplosioni e l'aumento delle temperature è stato rispondente alle previsioni di calcolo. Risulta, così, confermato come la mancanza di sfoghi nelle lastre *predalle* con alleggerimento in polistirene possa causare l'esplosione del manufatto così come avviene in caso di incendio reale. Inoltre, si è accertato come l'esplosione del manufatto abbia modificato sensibilmente la geometria della sezione resistente. Le armature, durante l'incendio, sono aggredite dal fuoco su più lati e l'estradosso del solaio è anch'esso esposto alle fiamme; la sua temperatura aumenta rapidamente, con conseguenze pericolose per la sicurezza delle persone presenti nei locali sovrastanti.

CONCLUSIONI

Ogni anno in Italia vengono prodotti oltre 10 milioni di m² di lastre prefabbricate alleggerite, per la maggior parte resistenti al fuoco, con le quali si realizzano solai d'impalcato di ospedali, centri commerciali, scuole, uffici, parcheggi, tutti edifici in cui una reale resistenza al fuoco assume un'importanza vitale per le persone presenti e per i Vigili del Fuoco che dovessero intervenire in caso d'incendio.

Tutte le aziende produttrici di solai a lastre alleggerite con polistirene certificano i loro manufatti con

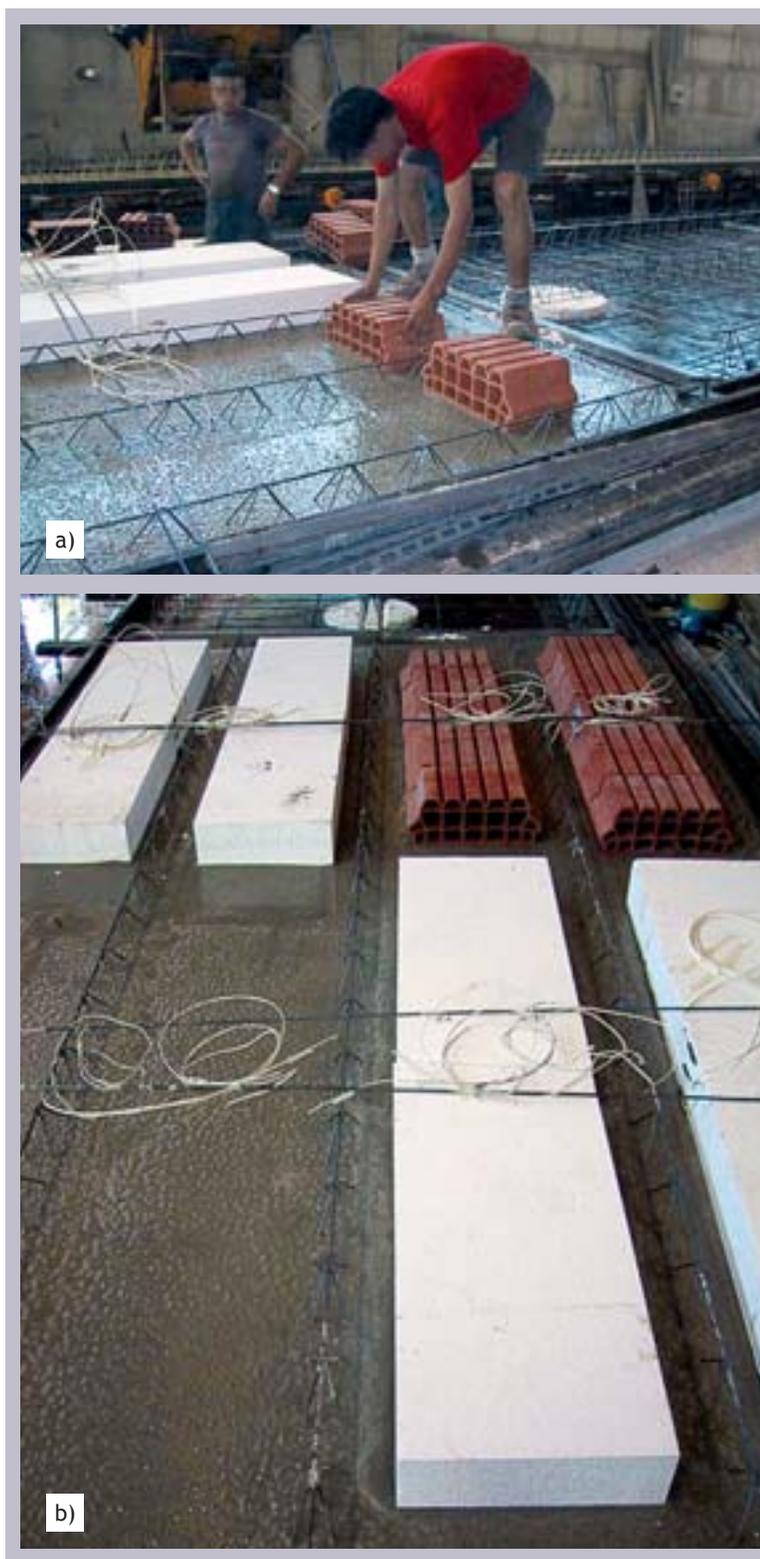


Fig. 4 - Foto della fase realizzativa del pannello di prova: posa dei blocchi in laterizio (a); lastra *predalle* al termine della messa in opera dei blocchi di alleggerimento (PSE e laterizi) e delle termocoppie (b).

una dichiarazione di resistenza al fuoco firmata da un tecnico abilitato, ma solo i prefabbricatori più scrupolosi realizzano lastre *predalle* realmente resistenti al fuoco, esenti da esplosioni, adottando, nel rispetto della specifica normativa, dispositivi in grado di assicurare un comportamento del manufatto congruente con i calcoli analitici.

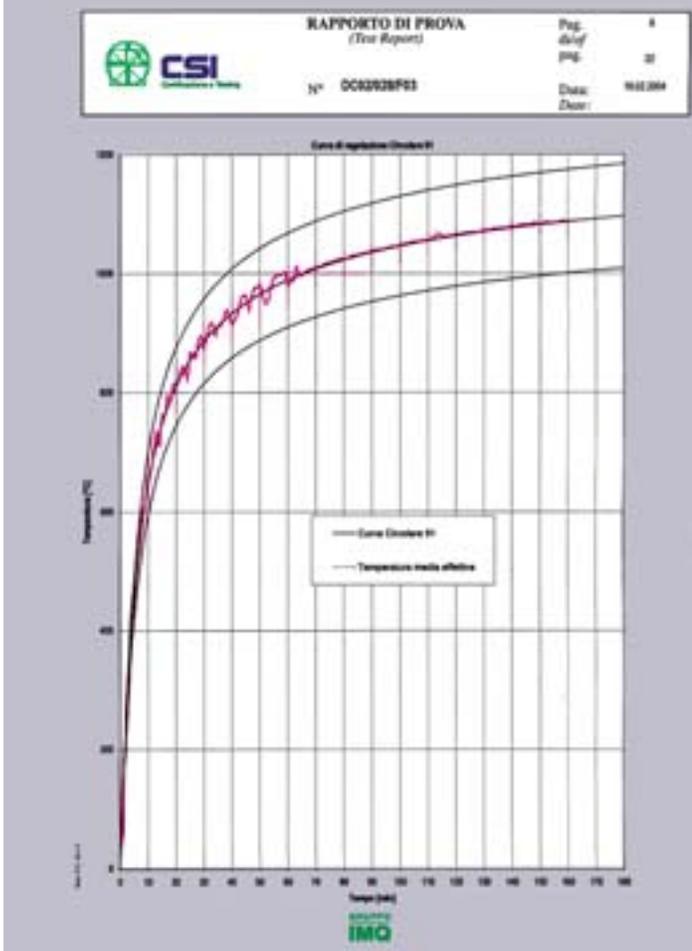


Fig. 5 - Curva tempo-temperatura impiegata per la prova.

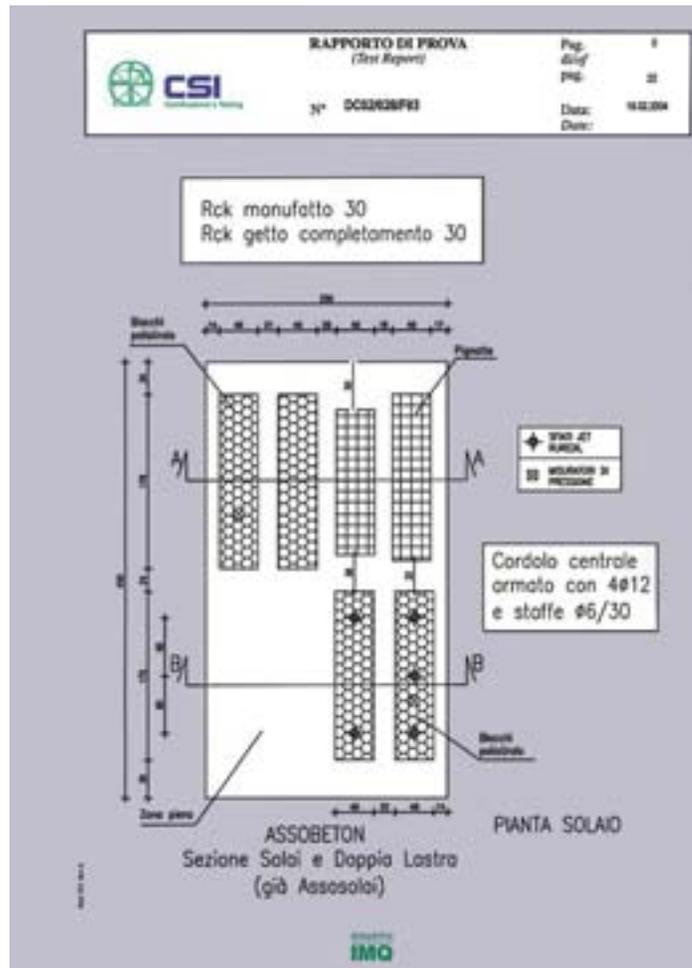


Fig. 6 - Elaborato grafico contenuto nel rapporto di prova: pianta del pannello testato.

La sperimentazione ha confermato la necessità di utilizzare dispositivi di sfogo che siano stati testati con prove in forno, in quanto è importante determinare la loro corretta quantità e disposizione nei manufatti prefabbricati. Alcuni produttori ignorano tale problema; certificano la resistenza al fuoco delle loro lastre *predalle* senza adottare alcun dispositivo, squalificando, così, l'intero settore.

Altri produttori, pur dimostrando di conoscere il problema della sicurezza antincendio, ricorrono all'uso di dispositivi "fai da te", quali tappi di sughero o cubetti di polistirene, che, prendendo fuoco in caso d'incendio, realizzano gli "sfoghi" previsti dal normatore. Tuttavia, il principale limite di questi dispositivi è che la loro affidabilità ed efficacia dipendono troppo dalla cura e perizia con cui gli operai li posizionano nel calcestruzzo fresco della lastra *predalle*. Si tratta, dunque, di elementari tentativi di trovare una scorciatoia, finalizzata solo ad un piccolo risparmio economico, piuttosto che alla ricerca di una nuova tecnologia per una maggiore sicurezza antincendio.

Nel momento in cui ai produttori di manufatti prefabbricati si richiedono maggiori controlli conseguenti alla marcatura CE obbligatoria, la ricerca di alternative di questo tipo non qualifica certamente né il prodotto, né il produttore. Lo stesso si può dire di dispositivi messi in commercio senza essere precedentemente testati in un forno di prova, oppure venduti come distanziatori, al fine di scaricare su tecnici e produttori che li adottano ogni responsabilità connessa al loro utilizzo.

È evidente, pertanto, come l'impiego di lastre di solaio con resistenza al fuoco "solo sulla carta e non reale" coinvolga le responsabilità civili e penali, non solo del produttore, del collaudatore e del costruttore, ma anche del progettista. Occorre ricordare in proposito che la dichiarazione del produttore non è sufficiente a sollevare il professionista o il costruttore dalle loro responsabilità, in quanto le conseguenze dell'assenza di sfoghi nelle lastre *predalle* in caso d'incendio sono note ed ampiamente diffuse nella letteratura tecnica. In tale contesto, vale la pena di sottolineare, inoltre, che l'art. 9 della Legge 1086/1971 ("Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica") stabilisce che il progettista delle strutture è responsabile dell'organico inserimento e della previsione di utilizzazione dei manufatti nel progetto delle strutture dell'opera.

È quindi doveroso da parte di progettisti, direttori dei lavori, collaudatori, costruttori, funzionari dei VVFF, controllare con attenzione e supervisionare l' idoneità al fuoco dei manufatti impiegati nella costruzione di edifici: la resistenza al fuoco non deve ridursi ad un mero adempimento burocratico, ma deve essere raggiunta realmente con una corretta progettazione ed una altrettanto corretta realizzazione.