

On the certification criteria for combustible and incombustible structures in terms of bearing capacity-R, integrity-E and insulation capacity-I

Sui criteri di certificazione per resistenza-R, integrità-E e potere isolante-I delle strutture combustibili e incombustibili

A. Dal Lago¹, B. Dal Lago²

¹ *DLC Consulting, Milan, Italy*

² *Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

ABSTRACT: The fundamentals of Structural Fire Engineering are presented and discussed in this paper, with reference to the fire performance and design approach concerning either combustible or incombustible structures, as there are some inconsistencies among the original concepts developed for incombustible structures and the current design approach. The evolution of the code provisions at the Italian and European level is critically presented, with specific reference to the progressive modification of some basic concepts, like the fire load, the required performance in terms of bearing capacity (R)/integrity (E)/insulation (I), and their relationship. The risk associated with the fire development in those buildings consisting of a single compartment or of several compartments, either isolated or contiguous to other buildings, is discussed, and the great danger exhibited by the buildings with several compartments and/or contiguous to other buildings is highlighted, with reference to combustible structures, which cannot rely on the passive protection offered by fire self-extinction. / La memoria propone una riflessione su alcuni temi fondamentali dell'Ingegneria del Fuoco, in particolare nei riguardi del comportamento al fuoco e dei criteri di progettazione per edifici aventi struttura combustibile o incombustibile. L'evoluzione del quadro normativo di riferimento nazionale, prima, ed europeo, successivamente, viene presentato e criticamente commentato, specialmente nei riguardi della progressiva modifica di alcuni concetti basilari, tra i quali il carico di incendio, la prestazione di resistenza (R)/integrità (E)/isolamento (I), e la loro relazione. Il rischio associato allo sviluppo di incendio in edifici monocompartimentati o multicompartimentati, sia isolati sia in aggregato, viene discusso, evidenziando l'elevato pericolo associato allo scenario di strutture combustibili multicompartimentate o non isolate, per le quali non è possibile fare affidamento sulla protezione passiva fornita dall'autoestinzione dell'incendio.

KEYWORDS: fire design; fire vulnerability; fire load; building regulations / progettazione antincendio; vulnerabilità al fuoco; carico di incendio; norme tecniche delle costruzioni

1 INTRODUZIONE

La presente memoria intende approfondire alcuni aspetti fondamentali dell'Ingegneria del fuoco nei riguardi delle prestazioni al fuoco e delle regole progettuali di edifici con struttura combustibile o incombustibile, mettendo in luce alcune incongruenze.

A tal fine, si ritiene necessario descrivere alcuni concetti fondamentali della materia, incluse le definizioni concettuali delle prestazioni richieste, l'evoluzione dell'inquadramento normativo della progettazione strutturale al fuoco, le peculiarità del comportamento al fuoco delle grandi strutture combustibili e incombustibili, gli sforzi tecnico-scientifici dispiegati per affrontare il problema.

Il legno rappresenta l'elemento strutturale combustibile più diffuso (è opinione diffusa che la medesima etimologia della parola "legno", dal latino "lignum", provenga da un'arcaica radice sanscrita che significa fatalmente: bruciare – Bonomi, 2004), e verrà considerato nella presente memoria a titolo esemplificativo.



Figure 1. Recent fire developed in a 7-storey apartment building under construction in Edimburgh, where, even without added fire load, the fire attacked the timber structure and it could not be extinguished despite the easily accessible intervention from 80 firemen. All 82 apartments and the crane in figure were lost / Recente incendio di una palazzina in costruzione di 7 piani in Edimburgo, dove pur con carico di incendio aggiunto nullo, il fuoco ha attaccato la struttura in legno e l'incendio non ha potuto essere spento nonostante l'intervento con facile accessibilità di 80 pompieri, per cui sono andati distrutti tutti gli 82 appartamenti e la gru a torre che si vede in fotografia.

La Figura 1, in cui è mostrato l'incendio di una struttura in fase di costruzione, invita a riflettere sul fatto che, come è ovvio, la struttura combustibile costituisce carico d'incendio.

La presenza di una struttura combustibile in una costruzione ha due effetti principali negativi in termini di comportamento al fuoco, rispetto ad una struttura incombustibile:

- l'aumento del carico d'incendio, definito in EC1 (CEN-EN 1991:2003) come la somma dell'energia termica rilasciata dalla combustione di tutti i materiali combustibili in uno spazio, inclusa la struttura.
- La perdita di volume nel tempo dovuta alla carbonizzazione, accompagnata da progressiva perdita di capacità portante.

2 VULNERABILITA' AL FUOCO DELLE STRUTTURE COMBUSTIBILI

Il comportamento al fuoco delle strutture in legno è, in generale, caratterizzato da una prolungata resistenza in funzione dello spessore degli elementi strutturali, in virtù della sua scarsa conducibilità termica che protegge le porzioni interne degli elementi da una rapida carbonizzazione.

Dopo lo scoppio dell'incendio, è di fondamentale importanza riuscire a spegnere il fuoco entro pochissimi minuti, prima che si raggiunga la temperatura di *flash-over*, superata la quale qualsiasi superficie combustibile del compartimento inizia a bruciare anche in assenza di contatto diretto con la fiamma. Sulla base della curva di incendio standardizzata (EC1:1-2), con la quale si determina la prestazione REI, tale temperatura viene raggiunta in circa 5 minuti da quando l'incendio diventa "generalizzato".

In Figura 2 si riporta la fotografia di una casa monofamiliare isolata in legno dove l'incendio ha raggiunto lo stadio "generalizzato" e oltrepassato la temperatura di *flash-over*. L'immagine chiarisce inequivocabilmente che cosa si intende per incendio "generalizzato" completamente sviluppato e lascia intuire l'impossibilità di spegnimento dell'incendio ad opera dei Vigili del Fuoco. In Figura 3 si riporta una drammatica fotografia di un tempestivo intervento di spegnimento in un incendio analogo al precedente, con evidenti rischi per l'incolumità degli agenti quando non fossero riusciti ad evitare il raggiungimento della temperatura di *flash-over*.

L'incendio si esaurisce quando è bruciato tutto il materiale combustibile interno, inclusa quindi la struttura nella sua integrità, e il compito principale dei Vigili del Fuoco è quello di evitare che l'incendio si propaghi alle abitazioni circostanti.



Figure 2. Mono-familiar isolated house subjected to post-flash-over fire / Edificio monofamiliare isolato con incendio in fase post-flash-over



Figure 3. The generalised fire can be extinguished with the intervention of the firemen, but when the flash-over temperature is attained, extinguishing the fire becomes very difficult and dangerous / L'incendio generalizzato si può ancora spegnere con l'intervento dei pompieri ma quando improvvisamente viene superata la temperatura di flash-over la sua estinzione diventa molto difficile e pericolosa

Con questi esempi si è fatto riferimento ad abitazioni isolate e di modesto sviluppo, quindi senza necessità di compartimentazioni.

Recentemente si sono verificati gravissimi incendi in strutture in legno di più importanti dimensioni anche quando il carico d'incendio dei materiali non strutturali presenti era pressoché nullo (Figura 1).

A Bradford (Inghilterra) l'11 maggio 1985 si stava svolgendo una partita di calcio nello stadio cittadino. La copertura in legno ha preso fuoco a causa di un falò acceso dai tifosi e si è propagato all'intera copertura (Figura 4). L'incendio ha distrutto molto velocemente i controventi facendo crollare sugli spettatori le travi. Vi furono 56 morti e 265 feriti.

Un caso analogo ha riguardato l'incendio di un ponte calcavia in legno in fase di costruzione nei pressi di Hesperia (California, USA, Figura 5), detto "Ranchero overpass".



Figure 4. Dramatic picture of the fire in Bradford stadium (England) in 1985 / Impressionante fotografia dell'incendio dello stadio di Bradford (Inghilterra) del 1985

L'incendio, divampato molto rapidamente per un' accidentale esposizione al cannello che serviva al taglio di alcune armature per c.a., ha provocato il collasso del ponte sulla Highway 395, principale via di collegamento tra Los Angeles e Las Vegas. La struttura ha continuato a bruciare per quasi 2 giorni provocando, con l'interruzione dell'autostrada sottostante, importanti disagi al traffico nazionale.



Figure 5. An ineffectual firekeeper facing the Rancho Bridge (California, USA) fire in 2014 / Un vigile del fuoco inerme di fronte all'incendio del ponte Rancho (California, USA) del 2014

Anche edifici di grande sviluppo mono-compartmentati e isolati con bassi carichi d'incendio hanno mostrato di non essere meno vulnerabili. Il 24 Luglio del 1987 la copertura del mercato dei fiori di San Remo con carico d'incendio nullo ma comunque progettata secondo la richiesta contrattuale per R60, realizzata con travi reticolari in legno su 80 metri di luce (Figura 6) ha preso fuoco a causa dell'incendio trasmesso durante le operazioni di impermeabilizzazione con guaine bituminose, ancora a causa di un maldestro uso del cannello, e all'arrivo dei pompieri è totalmente crollata, continuando a bruciare a terra per 24 ore. Nessuna vittima per assenza di pubblico, ma il danno è stato di 10 miliardi di lire.



Figure 6. Flower market in Sanremo (Italy), with the roof structure re-built as it was after the fire that brought to its complete destruction / Mercato dei fiori di Sanremo, con la copertura ricostruita con la medesima tecnologia dopo l'incendio che ne ha provocato la distruzione

Dall'articolo che si riporta in Figura 7 risulta evidente come a nulla sia valso il pronto intervento dei vigili del fuoco comunque molto impegnati per evitare che l'incendio potesse diffondersi agli edifici circostanti.

Vi sono poi drammatici esempi di disastri avvenuti anche in edifici di grande sviluppo che come tali devono essere compartimentati.

Il 4 Marzo del 2013 i 25000 mq della città della scienza di Napoli, realizzati con una magnifica copertura in legno lamellare, sono andati totalmente distrutti da un incendio durato tutta la notte (Figura 8). Se già è difficilmente ammissibile che un incendio possa provocare la completa distruzione di un compartimento, è certamente inaccettabile che la totalità di un'opera così importante e strategica sia andata completamente ridotta in cenere, essendo stata progettata con muri tagliafuoco di compartimentazione non efficaci.

SANREMO, PER UN INCIDENTE BRUCIA IL 'MERCATO DEI FIORI'

SANREMO Un enorme incendio ha devastato ieri mattina il nuovo mercato dei fiori di Sanremo, da alcuni anni in costruzione nella zona della Valle Armea, a pochi chilometri dalla città dei fiori.

Secondo le prime testimonianze, le fiamme sono comparse nell'ala nord-ovest del grande tetto in legno che ricopre con una superficie di oltre venticinquemila metri quadrati il nuovo mercato destinato a diventare uno dei centri di raccolta e di commercio dei fiori più grande d'Italia.

In pochi minuti la parte superiore del grande edificio, si è tramutata in un immenso rogo: è stata questa l'immagine spaventosa che si sono trovati dinanzi i primi vigili del fuoco accorsi sul posto.

Ancora pochi minuti e il tetto in fiamme è precipitato con fragore, questa, che ha comunque contribuito a restringere le fiamme e ad agevolare

l'intervento dei pompieri, impegnati anche a salvaguardare le abitazioni più vicine e alcuni depositi di carburante. L'intervento dei vigili del fuoco è stato comunque massiccio, con squadre arrivate anche da Imperia, Savona e Cuneo.

Figure 7. Excerpt from the daily journal Repubblica of 25-07-1987 / Estratto dell'articolo di Repubblica del 25-07-1987



Figure 8. Dramatic sequence of the fire of Città della Scienza in Naples (Italy) / Impressionante sequenza dell'incendio della Città della Scienza di Napoli

Se ora prendiamo in considerazione gli incendi sviluppatasi in agglomerati urbani composti prevalentemente da strutture combustibili, diventa chiaro il livello di rischio a cui tali agglomerati sono soggetti. Vi sono innumerevoli casi nella Storia dell'umanità di intere città divorate da incendi, come quello di Londra del 1666 (Figura 9) o quello di Chicago del 1871. Il problema della vulnerabilità al fuoco di strutture combustibili può perciò diventare un problema strategico nazionale. Per giustificare questa affermazione, si riporta alla memoria la delusione dei comandanti dei reparti bombardieri dell'aeronautica inglese (RAF) durante la II guerra mondiale, che hanno vissuto l'inefficacia delle strategie di bombardamento incendiario applicate ai centri storici delle città italiane, poiché costruiti prevalentemente con tecnologie in laterizio e calcestruzzo (Rastelli 2000). Le stesse tecniche si sono invece dimostrate devastanti nei confronti delle città tedesche, dove la presenza del legno da costruzione era assai più diffusa.

Inoltre, gli incendi hanno un costo in termini di perdita di vite umane. Circa un terzo degli incendi ha origine all'interno di edifici. Nell'intera Unione Europea il numero di morti per incendio è in media di 1,0 ogni 100000 abitanti il che equivale a circa 7400 morti all'anno (Fonte report della EU del 2009). Gli incendi hanno un impatto significativo sulla nostra economia con un costo che si aggira intorno all'1% del prodotto interno lordo.



Figure 9. Painting from Lieve Pietersz Verschuier showing the big fire of London of 1666 / Dipinto di Lieve Pietersz Verschuier che rappresenta il grande incendio di Londra del 1666

3 PROVA SPERIMENTALE DEL PROGETTO "SOFIE" E TECNICHE DI PROTEZIONE

Nonostante la comunità scientifica abbia focalizzato una certa attenzione sulla resistenza al fuoco degli elementi strutturali in legno, sono però scarsi in letteratura i casi di prove sperimentali di incendio di strutture in scala reale, che possano suggerire adeguate precauzioni di abbattimento della vulnerabilità al fuoco.

Per dimostrare che legno e fuoco non sono incompatibili, è stata allestita una prova di incendio su un edificio a 3 piani, realizzato con struttura portante totalmente in legno in forma di pannelli XLam (Bochicchio et al., 2008; Ceccotti et al., 2011). Sono stati posizionati sul pavimento di una stanza al primo piano 38 kg/m^2 di legna da ardere, equivalenti a circa l'80% del carico di incendio totale stimato (790 MJ/m^2 non considerando gli elementi strutturali) e prima di attivare l'incendio sono stati chiamati i vigili del fuoco con il compito di spegnere le fiamme dopo 60 minuti. Dopo un'ora di fuoco, la casa non è crollata e il fuoco è stato spento da più autopompe predisposte dai pompieri, con ciò dando per verificata la resistenza al fuoco della struttura dell'edificio che poteva essere classificato R60, come richiesto dalla norma per le abitazioni. La Figura 10 mostra lo sviluppo delle fiamme all'interno del compartimento. Tale risultato è stato raggiunto grazie alla protezione al fuoco del legno fornita da contropareti di cartongesso pluristrato poste su tutti i lati interni e da un'intonacatura esterna. Citando gli autori, gli spessori di ricoprimento e i materiali adottati sono in linea con la normativa giapponese di protezione al fuoco, e questo intervento era mirato a non far bruciare il legno strutturale per tutta la durata dell'incendio. L'edificio non presentava quindi il legno strutturale a vista. Tali pesanti misure di protezione al fuoco hanno impedito l'attacco del fuoco alla struttura fino a circa 50 minuti, dopodiché il fuoco ha cominciato ad attaccare le pareti verticali in XLam a causa dell'inatteso cedimento del cartongesso protettivo.



(a)



(b)

Figure 10. Prototype of timber building tested in fire for 60 minutes (a); the building, whose timber structure is visible in (b), was externally plastered and internally protected by means of multi-layer incombustible / Prototipo di un edificio con struttura in legno sottoposto ad una prova di resistenza al fuoco R60 (a). L'edificio sul cui fianco si vede il legno strutturale (b), è stato intonacato all'esterno mentre all'interno la struttura in legno è stata ricoperta da lastre incombustibili di cartongesso

Appare logico che, in assenza dell'intervento dei Vigili del Fuoco, pronti sul luogo con potenti mezzi di intervento e ottima accessibilità, il fuoco si sarebbe propagato agli altri ambienti e la casa avrebbe continuato a bruciare fino alla sua completa distruzione.

In generale, i metodi di protezione al fuoco delle strutture in legno consistono nell'applicazione di materiali igniritardanti, quali pannelli o vernici protettivi (Follesa & Lauriola, 2001). Tali interventi possono avere però un duplice scopo, dal quale dipende la loro progettazione, in accordo con l'Eurocodice 5:

- ritardare l'incendio della struttura lignea, prevedendone la combustione e la resistenza entro il tempo previsto, oppure

- impedire l'incendio della struttura lignea durante tutto il tempo previsto di sviluppo dell'incendio.

Solamente nel secondo caso si potrebbe affermare che il carico di incendio non è influenzato dalla

presenza della struttura lignea, e quindi mantenere il tempo previsto sulla base del carico termico dato dai soli elementi non strutturali. E' però da constatare come gli interventi di protezione vengano nella grande maggioranza dei casi progettati in accordo con il primo criterio.

4 INCENDIO ENTRO STRUTTURE INCOMBUSTIBILI

In alcune prove svolte da Welch et al. (2007) dove una tipica stanza compartimentata è stata sottoposta a incendio, si possono identificare le tipiche quattro fasi di incendio caratteristiche per strutture incombustibili (Figura 11):

I fase: incendio localizzato, facilmente estinguibile da chiunque

II fase: incendio generalizzato, con rapido aumento della temperatura dell'aria nel locale, estinguibile dai Vigili del Fuoco

III fase: superamento della temperatura di *flashover*, tutte le superfici combustibili del compartimento prendono fuoco istantaneamente, sviluppo completo dell'incendio, difficilmente estinguibile dai Vigili del Fuoco

IV fase: esaurimento o raffreddamento, con discesa delle temperature e calo delle fiamme per esaurimento del materiale combustibile all'interno del compartimento, gradualmente estinguibile dai Vigili del Fuoco.

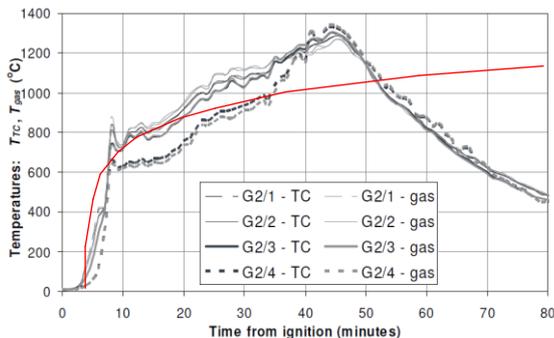
E' evidente che la IV fase possa avere luogo solo se la struttura è composta da materiale incombustibile, altrimenti si verificherebbe solo in conseguenza del collasso della struttura stessa.

Si noti che la curva di incendio nominale standard dell'EC1 parte 1-2 non contempla la fase di raffreddamento o autoestinzione. In effetti, la curva di incendio nominale standard è stata introdotta allo scopo di definire il tempo di richiesta prestazionale REI.

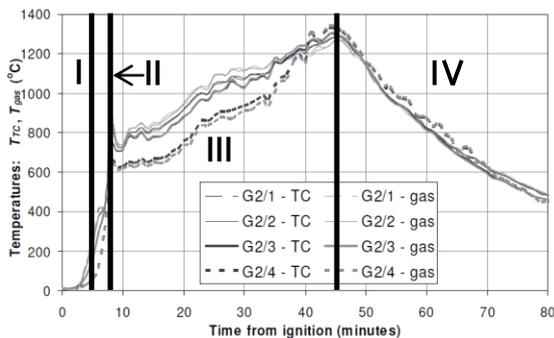
In Figura 12 sono schematicamente rappresentate le curve termiche dell'incendio nominale standard e di un incendio reale. Il tempo t_{REI} è definito come quel valore in ascissa che renda uguali le energie termiche sottese dalle curve standard e reale, nell'ipotesi convenzionale semplificativa che l'energia rilasciata dalla combustione sia - istante per istante - proporzionale alla temperatura massima raggiunta in quell'istante: $A_{reale} = A_{standard} \cdot t_{REI}$ è quindi quel lasso di tempo necessario sulla curva di incendio nominale standard affinché l'energia termica interna al compartimento sia completamente esaurita. Inizialmente, infatti, la prestazione REI era richiesta in kg/m^2 di legna equivalente al carico di incendio del compartimento. Da un punto di vista prestazionale, t_{REI} richiede che la struttura compartimentante resista (R), non trasmetta le fiamme (E) e

non trasmetta le elevate temperature (I) fino a quando l'incendio si auto-estingue, garantendo un'efficace protezione passiva. E' evidente che questo concetto è stato sviluppato per strutture incombustibili, mentre perde di significato per strutture combustibili, le quali alimentano l'incendio sino a quando non perdono la prestazione REI (e oltre).

Nonostante tale apparente contraddizione, le normative attuali nazionali e comunitarie accettano che le strutture di compartimentazione siano composte da materiale combustibile progettato per bruciare.



(a)



(b)

Figure 11. Experimental fire curve (a) of the temperature time history in a room surrounded by incombustible structures (from Welch et al.) compared with the nominal standard temperature-time curve of EC1 (in red). The different phases of the fire can be identified (b): (I) localised fire, (II) generalised fire, (III) attainment of flash-over and (IV) exhausting or self-extinction. / Curva sperimentale (a) dell'andamento della temperatura in un incendio scoppiato in una stanza circondata da struttura incombustibile (da Welch et al.) confrontato con la curva di incendio nominale standard (in rosso). Si possono identificare (b) le diverse fasi dell'incendio: (I) incendio localizzato, (II) incendio generalizzato, (III) superamento della temperatura di flash-over e (IV) esaurimento o raffreddamento

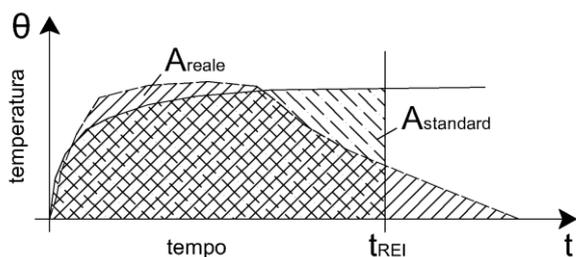


Figure 12. Sketch of real and nominal standard temperature-time curves and concept of t_{REI} / Schematizzazione di curve di incendio reale e nominale standard e concetto di t_{REI}

5 EVOLUZIONE DELL'INQUADRAMENTO NORMATIVO

Fino agli anni 80 per la resistenza al fuoco delle strutture si faceva riferimento alla legge 91 del 14/09/61 dove era esplicitamente richiesta la incombustibilità, per cui le strutture combustibili non erano ammesse.

Estratto dalla circolare N° 91 del 14-09-1961

Premesse

Le presenti norme hanno lo scopo di fornire i criteri per il proporzionamento della protezione contro il fuoco.....in modo che l'incendio delle materie combustibili nel fabbricato si esaurisca prima che le strutture stesse raggiungano temperature tali da comprometterne la stabilità.

La richiesta di prestazione REI di una struttura si è quindi impostata sui seguenti concetti:

- Tempo di evacuazione delle persone
- Tempo di esaurimento del carico di incendio

Nel medesimo documento normativo viene inoltre riportata la seguente considerazione: "La durata di resistenza al fuoco effettiva di un locale o di una struttura, sottoposti ad incendio reale, è in relazione diretta con la quantità di materiale combustibile presente, espressa dal "carico di incendio". Sulla base delle precedenti definizioni, appare evidente che l'introduzione di componenti strutturali combustibili andasse esplicitamente vietata, in quanto, oltre al notevole aumento del carico di incendio, l'incendio stesso non si esaurisce sino a che la struttura sia ridotta in cenere, avendo evidentemente perso ogni capacità portante.

Nella medesima normativa viene infatti esplicitamente vietato l'uso di materiali combustibili in almeno due passaggi:

Articolo 6

.....La struttura del solaio deve essere costituita da materiali incombustibili.

Articolo 11

...La gabbia delle scale ,degli ascensori e dei montacarichi.....devono essere realizzate con pareti in calcestruzzo armato oppure con strutture in acciaio rivestite in calcestruzzo.....

Successivamente è stata approvata una normativa sulla resistenza al fuoco basata sulla possibilità di applicare allo spessore di calcolo delle travi in legno uno spessore aggiuntivo destinato, a seconda del tempo di esposizione richiesto, a essere distrutto dal fuoco, come riportato anche nelle norme tecniche del 1996 e nei più recenti documenti. Tale normativa si basava sulla velocità di combustione del legno

per cui per avere R30, per esempio, occorre che dopo 30 minuti di incendio standard fosse bruciato poco più dello spessore di legno aggiunto. Questo permette di garantire il tempo di evacuazione, ma non permette l'esaurimento del carico d'incendio.

Nelle moderne normative di calcolo strutturale sia italiane che europee, alle quali le più recenti normative italiane fanno esplicito riferimento, la parola incombustibile è sparita nel calcolo della resistenza al fuoco ma si è ribadito che il tempo di esposizione dipende dal carico d'incendio cioè dal tempo occorrente perché il materiale presente bruci completamente e l'incendio si esaurisca, creando di fatto un'incompatibilità logica.

Nell'attuale bozza delle Norme Tecniche delle Costruzioni di imminente pubblicazione ufficiale, in §3.6.1.1 viene rimosso nella definizione del carico di incendio fornita dall'EC1 il concetto di partecipazione del materiale strutturale: "Nel caso di presenza di elementi strutturali lignei è possibile considerare solo una quota parte del loro contributo alla determinazione del carico di incendio...", ammettendo una solamente parziale relazione tra carico di incendio e t_{REI} e consentendo la realizzazione di strutture di compartimentazione progettate per bruciare.



Figure 13. Excerpt from the weekly journal l'Espresso of 8-8-2013 p.135 with rendering of a tower building with timber structure / Estratto da l'Espresso del 8-8-2013 pag.135 con rendering di edificio a torre con struttura interamente in materiale combustibile.

6 CONCLUSIONI

The paper deals with the current code approach for structural fire design, which basically treats in the same way both incombustible and combustible structures, the latter being designed under the assumption that they contribute to the combustion processes, by burning. In particular, the following considerations can be drawn:

- Combustible structures designed to burn increase the fire load;
- Above the flash-over temperature, extinguishing the fire becomes extremely difficult and dangerous for the firemen;
- As shown by several examples, multi-compartment buildings containing combustible structures have

been totally destroyed in spite of the massive intervention of the firemen;

- Fires developed in multi-compartment buildings where incombustible structures subdivide the environment, are self-extinguished, granting passive protection;

- The time requirement of REI performance is based on the concept that within that amount of time the fire load self-extinguishes.

Consequently, a logical incompatibility exists in the requirements concerning the bearing capacity/integrity/insulation capability (REI requirements) of combustible structures designed to burn.

Let us consider, as a final case study, a tower building with timber structure (Figure 13) in which a fire develops in a room. Let us further suppose that the timber structure is designed to burn, as usual, and to provide a REI performance for 120 minutes.

Once flash-over temperature is exceeded, all combustible materials inside the compartment start burning, including the structural panels, whose burning may be delayed by partial protective treatments. Any intervention by the firemen is hardly effective, especially if the fire develops towards the inner walls of the building, where generally the bracing core structures are not reachable by external hydrants. The result is that the whole building would burn down entirely after a sizable fire duration (more than 120 minutes).

On the other hand, if the structure of the wall separating the compartments is uncombustible and designed to provide the required REI performance, the fire would automatically self-extinguish, or the intervention of the firemen would be eased after entering the exhausting phase. The result is that the structural damage would be localised, and all other unities of the building would not suffer from any problem.

Two solutions to avoid the above-mentioned consequences corresponding to the use of combustible structures in compartments are the following:

- To prevent that the fire develops up to the flash-over phase, through the use of powerful and safe automatic extinguishment measures (if accepted by firemen),
- To prevent, via adequate shields and protections, that the timber starts burning along the full required time of development of the fire, up to the exhaustion of the fire load associated to non-structural components.

The authors hope that this paper will favour reflections on code provisions and day-by-day design, in order to facilitate the introduction of safe and robust criteria in the fire design of combustible multi-compartment or contiguous structures aimed at reducing the fire vulnerability in new constructions.

Nella presente memoria si è sviluppata una riflessione sull'approccio normativo vigente, che equipara sostanzialmente il comportamento al fuoco delle strutture combustibili progettate per bruciare a quello delle strutture incombustibili.

In particolare, dalle seguenti considerazioni:

- La struttura combustibile progettata per bruciare costituisce carico di incendio
- Superata la temperatura di flash-over all'interno di un compartimento, lo spegnimento dell'incendio ad opera dei VVFF è estremamente difficile e pericoloso
- Come mostrato, edifici multicompartimentati in struttura combustibile, dopo lo scoppio di incendio all'interno di un compartimento, sono andati completamente in cenere nonostante il massiccio intervento dei VVFF
- Incendi sviluppatasi in ambienti compartimentati da strutture incombustibili si autoestingono, garantendo protezione passiva
- La richiesta di tempo di prestazione REI è basata sul concetto che entro quel lasso di tempo il carico di incendio si sia esaurito da solo

si evidenzia un'incompatibilità logica nella richiesta di prestazione REI a strutture combustibili progettate per bruciare.

Consideriamo ora, a titolo di spunto di riflessione conclusiva, un edificio a torre con struttura interamente lignea (Figura 13) dove, in una stanza, scoppiò un incendio. Supponiamo ora che la struttura in legno, calcolata per bruciare, come avviene tradizionalmente, sia progettata per una richiesta di prestazione REI di 120 minuti.

Raggiunta velocemente la temperatura di flash-over, tutti i materiali combustibili presenti all'interno del compartimento iniziano a bruciare, inclusi i pannelli strutturali, eventualmente ritardati da trattamenti o protezioni parziali. Un intervento risolutivo dei Vigili del Fuoco è difficile da effettuare, come abbiamo già avuto modo di osservare, soprattutto se l'incendio si diffonde verso le pareti interne dell'edificio, dove le strutture portanti di controvento non sono in genere raggiungibili dagli idranti manovrati dall'esterno. Il risultato è che l'intero edificio, in un tempo maggiore di 120 minuti, brucerebbe interamente fino al collasso.

Se, invece, la struttura compartimentante la stanza ove scoppia l'incendio fosse incombustibile e progettata per resistere all'attacco del fuoco fino all'esaurimento del carico di incendio stimato, l'incendio si esaurirebbe autonomamente o lo spegnimento e il contenimento da parte dei VVFF sarebbe alquanto facilitato dopo il picco precedente la fase di autoestinzione, con il risultato che i danni strutturali provocati dall'incendio sarebbero sostanzialmente localizzati e che tutte le altre unità dell'edificio non avrebbero alcun problema.

Le due soluzioni individuabili per evitare le conseguenze descritte con l'utilizzo di strutture combustibili entro compartimentazioni sono le seguenti:

- Impedire che l'incendio si sviluppi sino al flash-over, attraverso l'uso di potenti e sicure misure di spegnimento automatico (se accettato dai VVFF),
- Impedire, con adeguate schermature e protezioni, che il legno cominci a bruciare durante tutto lo sviluppo dell'incendio fino all'esaurimento del carico di incendio associato ai componenti non strutturali.

Gli autori si augurano che la presente memoria costituisca uno spunto di riflessione a livello normativo e applicativo, affinché vengano adottati dei criteri di progettazione antincendio delle strutture combustibili multicompartimentate o contiguefiremen che mirino a ridurre significativamente la vulnerabilità al fuoco delle nuove costruzioni.

REFERENCES

- Bochicchio, G., Ceccotti, A., Frangi, A. & Lauriola M.P. 2008. Natural full-scale fire test on a 3-storey XLam timber building. *10th World Conference on Timber Engineering (WCTE)*, Miyazaki, Japan.
- Bonomi, F. 2004-2008. Vocabolario etimologico della Lingua Italiana. *etimo.it*.
- Ceccotti, A., Sandhass, C. & Yasumura, M. 2011. Il progetto sofie. prestazioni sismiche di edifici in x-lam. *L'Edilizia*, De Lettera Editore, 169.
- CEN-EN 1991-1-2. 2004. Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture. Parte 1-2: Regole generali - Azioni sulle strutture esposte al fuoco. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.
- CEN-EN 1995-1-2. 2005. Eurocodice 5 - Progettazione delle strutture di legno. Parte 1-2: Regole generali - progettazione contro l'incendio. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.
- C.N.R. DT 206/2007. 2007. Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo delle strutture in legno.
- D.M. Ministero dell'Interno. 9 marzo 2007. Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nell'attività soggette al controllo del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco.
- D.M.L.P. 16 gennaio 1996. Norme tecniche relative ai «Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi».
- D.M.L.P. 14 gennaio 2008. Norme tecniche per le costruzioni.
- Follesa, M. & Lauriola, M.P. 2001. La resistenza al fuoco delle strutture di legno. *Recupero e Conservazione*, De Lettera editore, 39.
- Ministero dell'Interno – Direzione generale dei servizi antincendi. Circolare n.91 del 14 settembre 1961.
- Rastelli, A. 2000. Bombe sulla città, gli attacchi alleati: le vittime civili a Milano. Ugo Mursia editore.
- Welch, S., Jowsey, A., Deeny, S., Morgan, R. & Torero, J.L. 2007. BRE large compartment fire tests – characterising post-flashover fires for model validation. *Fire Safety Journal*, 42, 548-567.