



Commissione per la Sicurezza
delle Costruzioni in Acciaio
in caso d'Incendio

Il progetto strutturale in condizioni di incendio di autorimesse aerate nell'ambito dell'approccio ingegneristico



Il progetto strutturale in condizioni di incendio di autorimesse aerate nell'ambito dell'approccio ingegneristico

Dott. Ing. S. Pustorino, Dott. Ing. Paola Princi

Structura Engineering

Prof. Ing. E. Nigro, Dott. Ing. Anna Ferraro

Università degli Studi di Napoli "Federico II" - D.I.ST. – Dip. di Ingegneria Strutturale

Dott. Ing. Mauro Caciolai, Dott. Arch. Valter Cirillo

Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

SOMMARIO – Grazie ad un progetto condotto nell'ambito delle ricerche finanziate dalla Comunità Europea, la metodologia dell'approccio ingegneristico per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio è stata messa a punto e verificata sperimentalmente con riferimento ad una tipologia di costruzione che ben si presta alla sua applicazione: i parcheggi aerati.

Nel lavoro vengono sintetizzati i principali risultati della citata ricerca europea e si eseguono alcune modellazioni numeriche per interpretare il comportamento termo-meccanico della struttura soggetta a prova. In seguito viene eseguita l'applicazione dell'approccio ingegneristico per la verifica strutturale in condizioni di incendio di un caso studio, ai sensi delle normative vigenti e sulla base dei risultati della citata ricerca Europea.

SUMMARY – In consequence of a research project done for the research program financed by the European Community, the procedure for the performance-based approach applied to the evaluation of structural fire safety has been prepared and experimentally tested with reference to a construction typology suitable for its application: the open car parks.

In this work, the main results of the mentioned European research have been summarized and some numerical applications have been made to evaluate the thermo-mechanical behaviour of the tested structure. After that, a performance based approach application for the evaluation of the structural resistance in case of fire has been made on an example, according to the in force standards and on the base of the mentioned European research.

1. Introduzione

Gli edifici adibiti al parcheggio di autovetture sono caratterizzati dalla necessità di elevate luci libere per la realizzazione dei minimi ingombri utili per il parcheggio delle auto e per la loro circolazione interna. Le strutture di acciaio e le strutture composte acciaio-calcestruzzo, mediante le quali è possibile ottenere soluzioni caratterizzate da leggerezza dei pesi strutturali e da velocità di costruzione, forniscono una risposta efficace alle esigenze di tipo architettonico e funzionale di questi edifici.

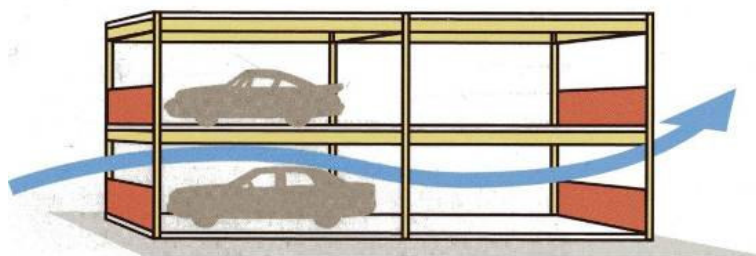


Figura 3 - Schema di parcheggio aerato

Spesso, quando sono realizzati fuori terra, questi edifici sono caratterizzati da ampia ventilazione naturale, presente in ogni piano, da cui il nome di parcheggi aerati. Questa caratteristica determina effetti positivi anche sul comportamento strutturale in caso di incendio, favorendo l'impiego delle strutture di acciaio.



Figura 4 - Esempio di parcheggio aerato realizzato in Lussemburgo

Recentemente in ambito europeo è stata condotta un'estesa campagna di prove sperimentali per la verifica delle prestazioni in caso di incendio delle strutture in acciaio e in acciaio-calcestruzzo di parcheggi aerati. Per consentire l'applicazione dell'approccio ingegneristico, a conclusione di questo progetto di ricerca, è stata pubblicata una linea guida [14] per la definizione degli scenari di incendio che devono essere analizzati quando si valuta la sicurezza strutturale di autorimesse di tipo aerato.

Un'analisi del quadro normativo nazionale ed europeo con riferimento all'applicazione dell'approccio ingegneristico per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio di questa tipologia di edifici è stata condotta nel documento [27].

2. La campagna di ricerca condotta per l'applicazione dell'approccio ingegneristico al caso dei parcheggi aerati

2.1 I risultati della ricerca europea

Il tema della sicurezza in caso di incendio dei parcheggi aerati è stato affrontato nell'ambito della già citata ricerca, "*Demonstration of Real Fire Tests in Car Parks and High Buildings*" (CEC Agreement 7215 - PP/025 2001) [13], sviluppata tra il 1998 e il 2000 da CITCM (France), PROFIL-ARBED Recherches (Luxembourg) e TNO (The Netherlands).

Nell'ambito di questa ricerca è stata condotta, preliminarmente, una classificazione delle tipologie di autovetture in circolazione sulla base del potenziale termico che possono rilasciare in caso di incendio (Tabella 1). Tale classificazione è stata determinata attraverso i risultati delle prove sperimentali su auto reali, effettuate sotto il "calorimetric hood" (Figura 5), che hanno anche permesso di determinare le curve di rilascio termico (curve RHR) tipiche delle automobili in circolazione; in Figura 6 è riportata la curva RHR, relativa ad un'auto di classe 3 (Tabella) con potere calorifico di 9500 MJ.

Si noti come le autovetture oggi circolanti forniscano un contributo all'incendio più elevato rispetto a quanto riportato dai correnti dati bibliografici (da Elifani-Giomi [16], ed. 2003, valore del potere calorifico di un'autovettura pari a circa 5.000 MJ).

Tipo	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Peugeot	106	306	406	605	806
Renault	Twingo-Clio	Megane	Laguna	Safrane	Espace
Citroen	Saxo	ZX	Xantia	XM	Evasion
Ford	Fiesta	Escort	Mondeo	Scorpio	Galaxy
Opel	Corsa	Astra	Vectra	Omega	Frontera
Fiat	Punto	Bravo	Tempra	Croma	Ulysse
Volkswagen	Polo	Golf	Passat	-	Sharan
Potenziale calorifico	6000 MJ	7500 MJ	9500 MJ	12000 MJ	

Tabella 1 - Classificazione delle autovetture

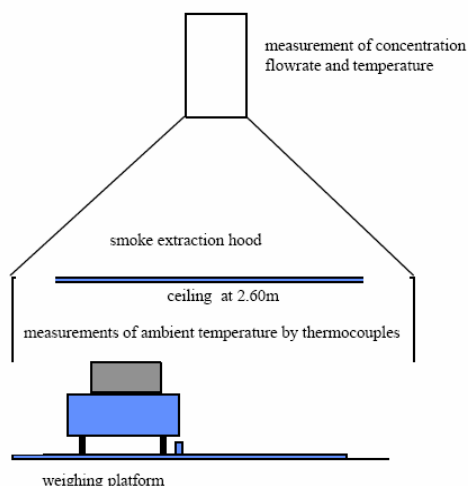


Figura 5 - Configurazione del test al "calorimetric hood" e l'esecuzione di una prova (tratto da [13]).

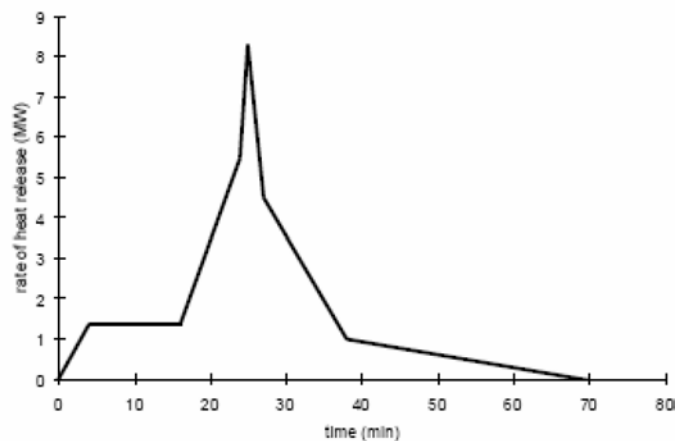


Figura 6 - Tasso di rilascio termico di un'auto di classe 3 (tratto da [13]).

Nell'ambito della ricerca è stata anche condotta un'analisi statistica studiando 78 schede di intervento per incendi in autorimesse effettuati dai Vigili del Fuoco di Parigi nel periodo che va dal 1995 al 1997, oltre ad altri dati di alcune grandi città europee; la statistica è servita per la definizione degli scenari di incendio più probabili negli edifici adibiti ad autorimessa. Da ogni report, infatti, sono stati ricavati i seguenti dati: durata dell'intervento, persone ferite, tipologia di edificio, danni provocati alla struttura, fonte di innesco, numero di autoveicoli coinvolti, tempo di estinzione, tempi di propagazione delle fiamme. La 7 si riferisce, ad esempio, alla statistica del numero di veicoli coinvolti negli incendi.

Ulteriori dettagli sono contenuti nel report finale della ricerca e nella letteratura tecnica correlata [13], [26], [27].

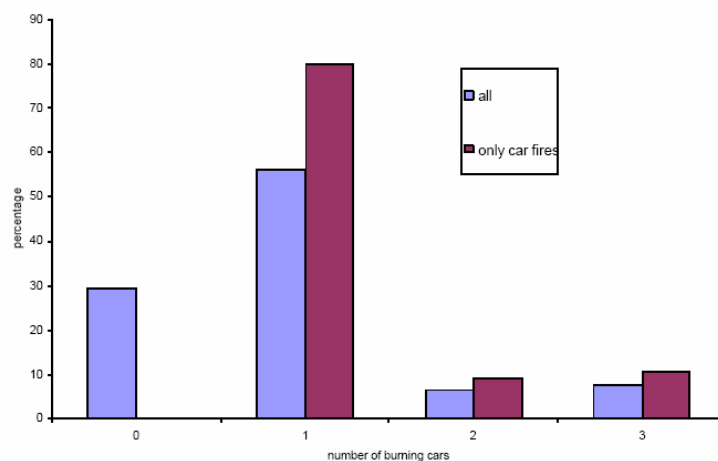


Figura 7 - Numero di veicoli coinvolti negli incendi (tratto da [13]).

La parte più consistente della ricerca è rappresentata dalle prove in scala reale sull'edificio monopiano rappresentato in Figura 8 e realizzate a Vernon in Francia. Gli scenari di incendio e le modalità di innesco sono stati individuati sulla base delle condizioni geometriche della struttura e dei dati statistici sugli incendi reali. Sono stati svolti tre test differenti facendo variare lo scenario di incendio. In tutti i test le tre auto incendiate si trovavano al livello inferiore, mentre su quello superiore sono state parcheggiate 11 auto, che costituivano il carico statico di esercizio dell'autorimessa.

Durante ogni test è stata misurata la temperatura dei gas in vari punti dell'autorimessa, la temperatura degli elementi strutturali, la temperatura all'interno delle auto, i flussi di calore e gli spostamenti in alcuni punti della struttura. È, inoltre, stata osservata la propagazione dell'incendio alle auto e lo sviluppo dei fumi all'interno del parcheggio. Al termine di ciascuna prova sono state rilevate deformazioni negli elementi strutturali, oltre ad instabilità e danneggiamenti locali, che però non hanno pregiudicato la stabilità globale della costruzione.



Figura 8 - Foto del prototipo durante la costruzione e durante una prova sperimentale di incendio.

Questo edificio, realizzato con colonne di acciaio ed impalcato in struttura composta acciaio-calcestruzzo, è composto da tre telai principali aventi interasse pari a 16 m, ciascuno con colonne di acciaio incernierate alla base, poste a distanza reciproca di 5 m; le travi principali sono collegate mediante nodo cerniera alle colonne. Le travi secondarie, disposte con interasse di 2.5 m, hanno schema statico di trave continua su tre appoggi con luce libera di 16 m e sono collegate al solaio mediante connettori in modo da garantire il comportamento di trave composta. Le travi principali, anch'esse composte con il solaio, hanno luce di 5 m e, come detto, presentano le estremità incernierate alle colonne. In entrambe le direzioni sono disposti controventi per la resistenza alle azioni orizzontali. L'interasse delle colonne si adatta bene alle tipiche dimensioni degli stalli per la

sosta delle auto, mentre la luce delle travi secondarie permette che ogni campata possa contenere due file di parcheggi e una corsia di dimensioni standard. In Figura 9 è riportato uno schema di carpenteria e la sezione trasversale, mentre nella Tabella 2 sono riportate le sezioni degli elementi strutturali.

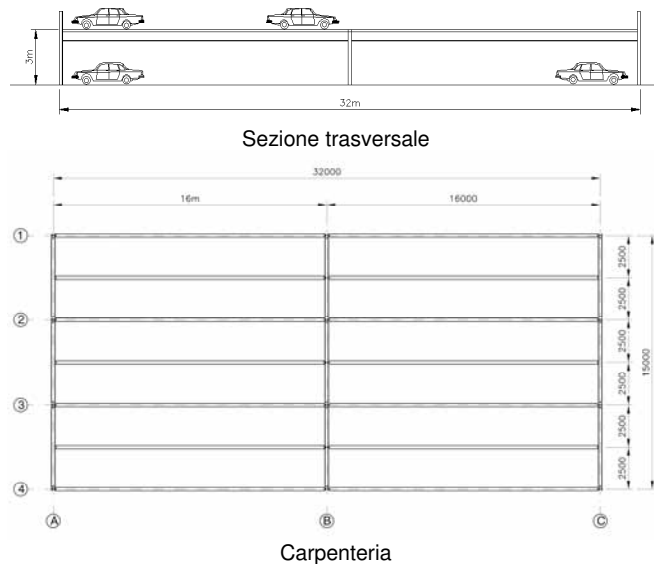


Figura 9 - Il prototipo sottoposto a prova sperimentale.

Il solaio utilizzato è composto da lamiera grecata in acciaio, del tipo Cofrastra 40, con interasse di 2.5 m e getto collaborante in calcestruzzo armato, con altezza complessiva di 12 cm. I materiali adoperati sono:

- acciaio per carpenteria metallica S235;
- acciaio per barre d'armatura B450C;
- calcestruzzo C30/37.

ELEMENTI STRUTTURALI		
Elemento	L [m]	Sezione
Travi secondarie	16.00	IPE 550
Travi principali linee A e C	5.00	IPE 400
Travi principali linea B	5.00	IPE 500
Colonne linea B	3.00	HEB 200
Colonne linea A e C	3.00	HEA 180

Tabella 2 - Sezioni degli elementi strutturali

Il primo test è stato eseguito con tre auto posizionate in stalli adiacenti in prossimità delle colonne centrali (Figura 10): la prima auto innescata è quella centrale (a partire da un focolaio costituito da eptano); successivamente le fiamme si sono propagate alla seconda auto, dopo circa 12 min, e alla terza auto, dopo 36 min, che si trovano ubicate ai lati della prima.

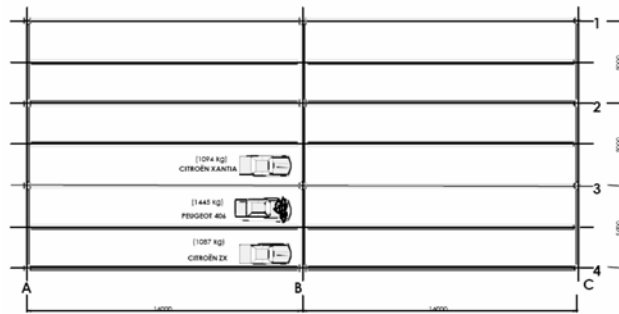


Figura 10 - Scenario di incendio nel test 1.

La temperatura media dell'ambiente all'interno del parcheggio (Figura 11) si è mantenuta sempre piuttosto bassa; essa ha raggiunto valori elevati solo localmente in corrispondenza delle auto incendiate, ma si riduceva sensibilmente allontanandosi dalle fiamme. La temperatura nelle travi (Figura 15) è risultata variabile in funzione della distanza delle sezioni dal focolaio e sono state registrate differenze di circa 200°C tra l'ala superiore e quella inferiore delle travi. La temperatura massima raggiunta negli elementi d'acciaio non ha superato i 700°C, mentre nel calcestruzzo non ha superato i 360°C sulla superficie esposta e i 100°C all'interno della soletta. Nel solaio si sono registrate temperature massime in corrispondenza della posizione della terza auto.

Gli spostamenti verticali nella sezione centrale delle travi secondarie (Figura 12) hanno raggiunto lo 0.4% della lunghezza della trave e si è verificato un inarcamento verso l'alto nella fase di raffreddamento.

87/38	109/48	100/55	80/46
109/58	190/97	280/109	120/71
150/102	430/238	740/249	200/121
240/168	1000/501	880/278	250/156
240/175	1040/510	640/239	200/149
240/121	900/324	850/254	200/116

Figura 11 - Temperatura max e media nell'ambiente all'intradosso del solaio in corrispondenza di ogni posto auto (Test 1).

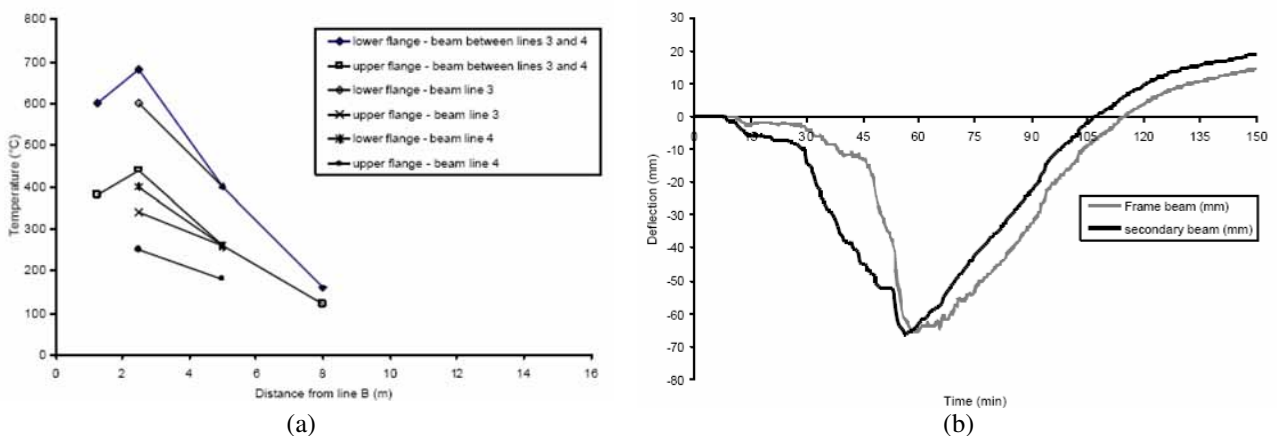


Fig. 12 – Test 1: a) Temperatura massima nelle travi; b) Spostamento verticale mezzera della trave tra i fili 3 e 4.

E' stato successivamente condotto un secondo test utilizzando lo stesso scenario di incendio, ma con le auto posizionate sul lato opposto del parcheggio. La prova è stata condizionata dalla presenza di forte vento che ha provocato una più rapida propagazione delle fiamme alle auto adiacenti a quella innescata per prima. Ciò non ha pregiudicato la resistenza della struttura.

Infine, l'ultimo test è stato quello eseguito per verificare le condizioni di propagazione dell'incendio tra due auto parcheggiate frontalmente l'una all'altra (Figura 13). In questo caso è stato posto uno schermo in prossimità dell'auto 1 per limitare l'influenza del vento.

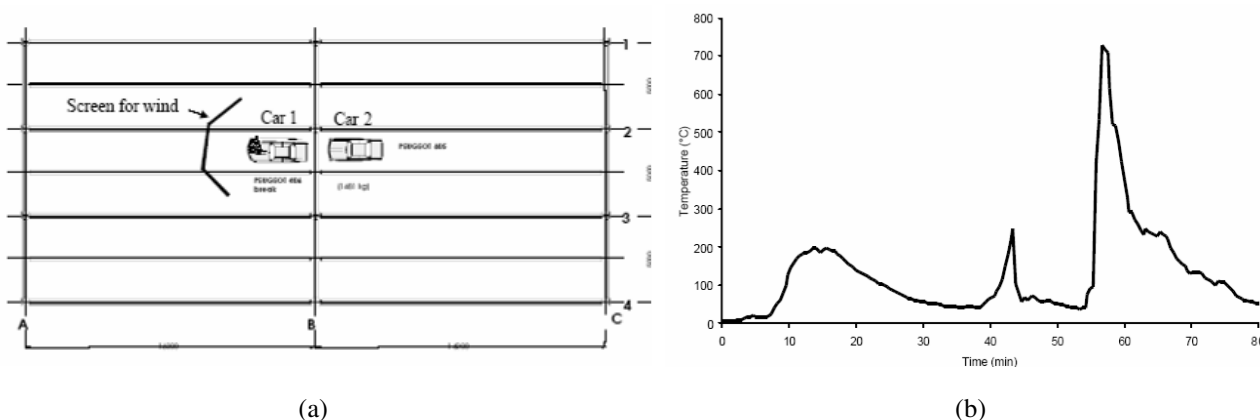


Fig. 13 - Scenari di incendio nel test 3: a) Disposizione delle auto; b) Curva della temperatura dell'aria sopra l'auto 1.

Le fiamme si sono propagate molto lentamente; l'auto 2 ha preso fuoco dopo 56 min dall'inizio dell'incendio, quando ormai l'incendio della prima auto si era esteso a tutto il veicolo.

La temperatura nel parcheggio (Figura 13) è risultata mediamente bassa, ad eccezione di picchi concentrati che non hanno comportato grandi innalzamenti di temperatura negli elementi strutturali. Infatti, la temperatura dei profili durante la prova è rimasta sempre piuttosto contenuta e le deformazioni conseguenti sono state molto limitate.

2.2 La determinazione degli scenari di incendio di progetto

Ai sensi del D.M. 09/05/07 [10] per “scenario di incendio” deve intendersi “la descrizione qualitativa dell'evoluzione di un incendio che individua gli eventi chiave che lo caratterizzano e che lo differenziano dagli altri incendi. Di solito può comprendere le seguenti fasi: innesco, crescita, incendio pienamente sviluppato, decadimento. Deve, inoltre, definire l'ambiente nel quale si sviluppa l'incendio di progetto ed i sistemi che possono avere impatto sulla sua evoluzione, come ad esempio eventuali impianti di protezione attiva”.

Gli scenari di incendio rappresentano dunque la schematizzazione degli eventi che possono ragionevolmente verificarsi. Nel processo di individuazione degli scenari di incendio di progetto, devono essere valutati tutti gli incendi realisticamente ipotizzabili, scegliendo i più gravosi per lo sviluppo e la propagazione dell'incendio e la conseguente sollecitazione strutturale oltre che per la sicurezza delle squadre di soccorso. A partire da queste premesse appare chiaro che la corretta individuazione degli scenari di incendio costituisce la fase centrale nell'ambito del processo di progettazione prestazionale e pertanto è quanto mai opportuno che la loro definizione sia condivisa in fase preventiva da parte dell'organo di controllo.

Lo scenario di incendio è sensibilmente influenzato, tra l'altro, dalla geometria dei locali che costituiscono il compartimento e dalle loro condizioni di ventilazione naturale. Le caratteristiche geometriche, di uso e di ventilazione naturale di un'autorimessa aerata permettono di individuare un numero limitato di scenari di incendio mediante i quali è possibile rappresentare i prevedibili e più pericolosi eventi ai fini della stabilità strutturale.

Per consentire l'applicazione dell'approccio ingegneristico, a conclusione del progetto di ricerca [13] è stata pubblicata una guida per la definizione degli scenari di incendio che devono essere analizzati per la sicurezza strutturale di autorimesse di tipo aerato.

A questo proposito, vale la pena precisare le condizioni minime che devono essere verificate affinché un'autorimessa possa ritenersi aerata ai sensi di Arrête du 9 Mai 2006 [7]:

- ad ogni piano le aperture siano poste almeno su due facciate opposte;
- la superficie di apertura sia almeno il 50% della superficie delle pareti su cui si trovano;
- la distanza tra facciate opposte aperte sia inferiore a 75 m;
- la superficie di apertura ad ogni piano sia maggiore del 5% della superficie in pianta del piano.

Nella linea guida (INERIS, 2001, [14]) sono stati individuati tre schemi base (Figure 14, 15, 16) utilizzati per la definizione degli scenari più pericolosi nelle realizzazioni standard, mentre per conformazioni particolari del piano di parcheggio gli scenari di incendio devono essere definiti caso per caso.

Scenario di tipo 1 (Figura 14): caratterizzato dall'incendio di un veicolo di classe 3 (vedi Tabella 2) o, se necessario, di un veicolo commerciale in corrispondenza della mezzera della trave.

Scenario di tipo 2 (Figura 15): caratterizzato dalla propagazione simmetrica dell'incendio a partire dall'auto centrale con un tempo di ritardo dell'innescò pari a 12 min, coinvolgendo sette veicoli di classe 3; se necessario, può essere prevista anche la presenza di un veicolo commerciale posto al centro (quindi incendiato per primo) o di fianco alla prima auto innescata.

Scenario di tipo 3 (Figura 16): caratterizzato dall'incendio di quattro veicoli di classe 3 (se necessario uno di essi può essere un veicolo commerciale) posti intorno ad una colonna a partire dall'incendio di uno dei veicoli con tempo di ritardo dell'innescò delle auto adiacenti di 12 min.

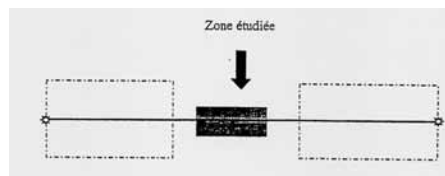


Figura 14 - Scenario di incendio di tipo 1 (da INERIS [14])

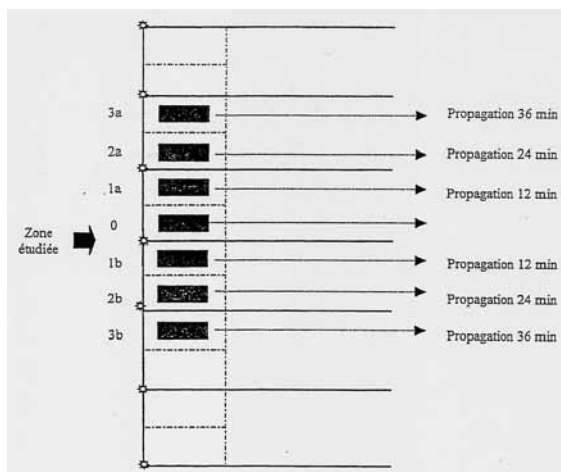


Fig. 15 - Scenario di incendio di tipo 2 (da INERIS [14])

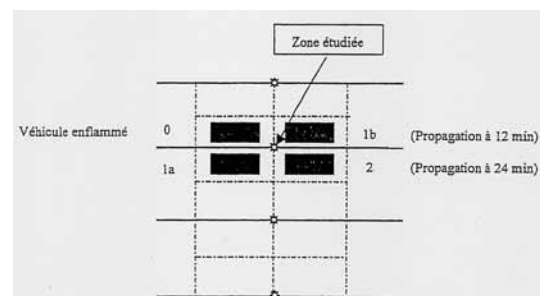


Fig. 16 - Scenario di incendio di tipo 3 (da INERIS [14])

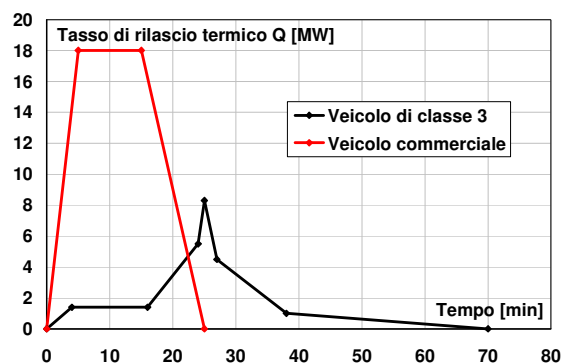


Figura 17 - Curve di rilascio termico RHR per due tipologie di veicoli.

La linea guida INERIS [14] fornisce anche i dati del tasso di rilascio termico delle due tipologie di autoveicoli considerati negli scenari di incendio tipo proposti. Nella figura 17 è riportato l'andamento del tasso di rilascio termico per le due tipologie di autoveicoli considerati, mentre nella figura 18 è riportato l'andamento del tasso di rilascio termico globale di ognuno degli scenari tipo, relativi rispettivamente agli scenari definiti con sole autovetture di categoria 3 (figura 18-a) e con autovetture di categoria 3 ed un autoveicolo commerciale (figura 18-b).

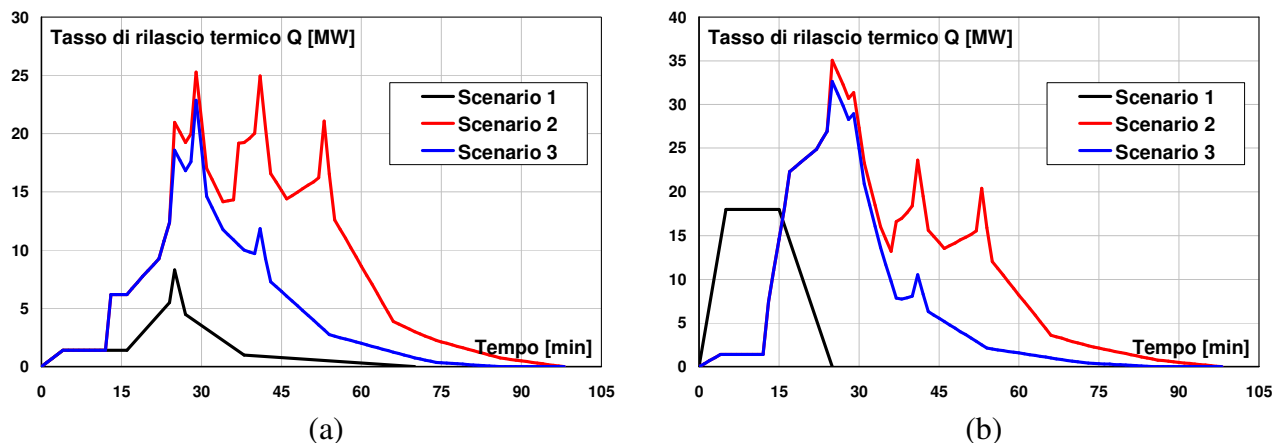


Figura 18 - Curve di rilascio termico RHR per i diversi scenari.

Si noti che la linea guida prevede la presenza di un veicolo commerciale caratterizzato da un elevato potere calorifico allo scopo di considerare anche il caso di una condizione di incendio particolarmente severa, rispetto alle autovetture che sono ordinariamente parcheggiate in un'automessa.

2.3 Simulazione numerica del comportamento termo-meccanico

Nell'ambito della ricerca [13] è stata eseguita la simulazione numerica del comportamento termo-meccanico della struttura portante per ognuno degli scenari di incendio sperimentati, confrontando i risultati del calcolo strutturale con quelli delle prove sperimentali.

Per analizzare anche il comportamento strutturale in una corrispondente configurazione di carico prevista dalle normative vigenti, è stato preso in considerazione uno degli scenari oggetto della sperimentazione, lo scenario 2, ed è stato studiato in presenza delle azioni definite in ambito normativo:

- per quanto riguarda l'evoluzione dello scenario, secondo quanto previsto dalla linea guida INERIS [14];
- per quanto riguarda le azioni termiche e meccaniche, secondo quanto previsto dalle norme vigenti, in particolare D.M. 14/01/08 [11], EN1991-1-2 [4], EN1993-1-2 [5], EN1994-1-2 [6].

Queste analisi sono riportate in dettaglio nella pubblicazione [27]. È interessante ricordare le loro principali conclusioni, ossia che le valutazioni analitiche condotte sulle configurazioni di progetto definite dalle normative vigenti sono risultate coerenti con il comportamento degli elementi strutturali verificato durante i test sperimentali, portando a risultati complessivamente a vantaggio di sicurezza.

3. Applicazione dell'approccio ingegneristico ad un caso studio

Nel presente paragrafo si esemplifica l'applicazione dell'approccio ingegneristico per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio di autorimesse di tipo aerato realizzate con struttura di acciaio e/o composta acciaio-calcestruzzo.

Il caso studio è costituito da un'autorimessa isolata, realizzata su due livelli fuori terra, aerata (secondo la definizione riportata nel paragrafo 3.2), avente le stesse caratteristiche geometriche e costruttive del prototipo sottoposto a prova nel progetto di ricerca [13] e illustrato nel paragrafo 3.1. Tale struttura può costituire anche la sottostruttura significativa da analizzare nel caso di un parcheggio più ampio di tipologia simile a quella del prototipo (vedi figura 19).

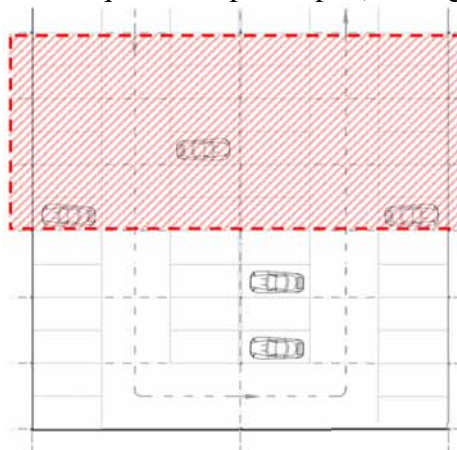


Figura 19 - Esempio di sottostruttura

L'applicazione dell'approccio ingegneristico viene condotta seguendo i criteri definiti nel Documento Interpretativo [2] e le disposizioni riportate nel D.M. 09/05/07, secondo i seguenti passi principali:

- 1) scelta degli obiettivi di sicurezza;
- 2) selezione degli scenari di incendio più pericolosi ai fini della stabilità strutturale;
- 3) analisi della struttura in condizioni di incendio, per ognuno degli scenari considerati;
- 4) verifica degli obiettivi di sicurezza fissati, per ognuno degli scenari di incendio considerati.

3.1 Scelta degli obiettivi di sicurezza

Come già ricordato nel paragrafo 1.1, per il caso di un'autorimessa aperta al pubblico appare adeguato il terzo degli obiettivi di sicurezza definiti per l'applicazione dell'approccio ingegneristico nell'ambito del Documento Interpretativo [2], ossia "resistenza al fuoco della struttura portante per un tempo tale da permettere la combustione di tutti i materiali combustibili presenti, senza tenere conto dell'intervento delle squadre di soccorso". Come previsto dalle disposizioni riportate nel D.M. 9/5/07 e nel collegato D.M. 9/3/07, deve pertanto essere verificata la stabilità strutturale per tutta la durata dell'incendio di ogni incendio progetto, compresa la fase di raffreddamento fino al ritorno alla temperatura ambiente. Questo obiettivo di sicurezza risulta anche conforme rispetto al livello di prestazione associabile a questo tipo di edificio ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni [11] (livello III dei livelli di prestazione in caso di incendi).

Oltre a questo obiettivo di sicurezza, è da ricordare quanto previsto dal D.M. 09/03/07 [9], cui rimanda anche il D.M. 09/05/07 [10], ossia che, qualora il progettista opti per l'approccio prestazionale, deve essere comunque eseguita la verifica della capacità portante degli elementi costruttivi rispetto all'azione termica della curva di incendio nominale standard, determinando le classi di resistenza richieste in funzione del carico di incendio specifico di progetto secondo una regola convenzionale definita nella Tabella 5 dello stesso decreto.

3.2 Determinazione degli scenari di incendio di progetto

Gli scenari di incendio di progetto sono definiti seguendo le indicazioni della guida INERIS [14]. Essi sono stati determinati prevedendo sia la presenza di sole autovetture di classe 3, sia la presenza

del camioncino commerciale (VAN), secondo le ipotesi previste dalla linea guida.

In particolare, sono stati analizzati gli scenari di incendio illustrati in Figura 20:

- scenario 1, un VAN posto al centro della corsia di manovra (Figura 20-a);
- scenario 2, 4 auto di classe 3 intorno ad una colonna centrale (l'incendio parte da un'auto e si propaga dopo 12 min all'auto accanto e contemporaneamente a quella posta di fronte; dopo 24 min si propaga alla quarta auto);
- scenario 2', 3 auto di classe 3 e un VAN intorno ad una colonna centrale (l'incendio parte da un'auto e si propaga dopo 12 min al VAN e all'auto che le si trova più vicina; dopo 24 min si propaga alla quarta auto) (Figura 20-b);
- scenario 3, 6 auto di classe 3 in posti tra loro adiacenti in prossimità della fila centrale di colonne (l'incendio parte dall'auto centrale e si propaga dopo 12 min alle due laterali; dopo 24 min si propaga alla quarta e quinta auto sui due lati delle prime tre auto e dopo 36 min si propaga alla sesta);
- scenario 3', 5 auto e un VAN in posti tra loro adiacenti in prossimità della fila centrale di colonne (l'incendio parte da un'auto e si propaga dopo 12 min al VAN e all'auto che le si trova più vicina; dopo 24 min si propaga alla quarta e quinta auto sui due lati delle prime tre auto e dopo 36 min si propaga alla sesta) (Figura 20-c);
- scenario 4, 6 auto di classe 3 in posti tra loro adiacenti in prossimità della fila laterale di colonne; l'incendio parte dall'auto centrale e si propaga dopo 12 min alle due laterali, dopo 24 min si propaga alla quarta e quinta auto sui due lati delle prime tre auto e dopo 36 min si propaga alla sesta;
- scenario 4', 5 auto e un VAN in posti tra loro adiacenti in prossimità della fila laterale di colonne (l'incendio parte da un'auto e si propaga dopo 12 min al VAN e all'auto che le si trova più vicina; dopo 24 min si propaga alla quarta e quinta auto sui due lati delle prime tre auto e dopo 36 min si propaga alla sesta) (Figura 20-d).

E' da notare che la linea guida INERIS [14] per gli scenari di incendio 2-3-4 prevede la combustione di 7 autoveicoli (vedi figura 15), che qui sono ridotti a 6 a causa delle particolari dimensioni geometriche del caso studio.

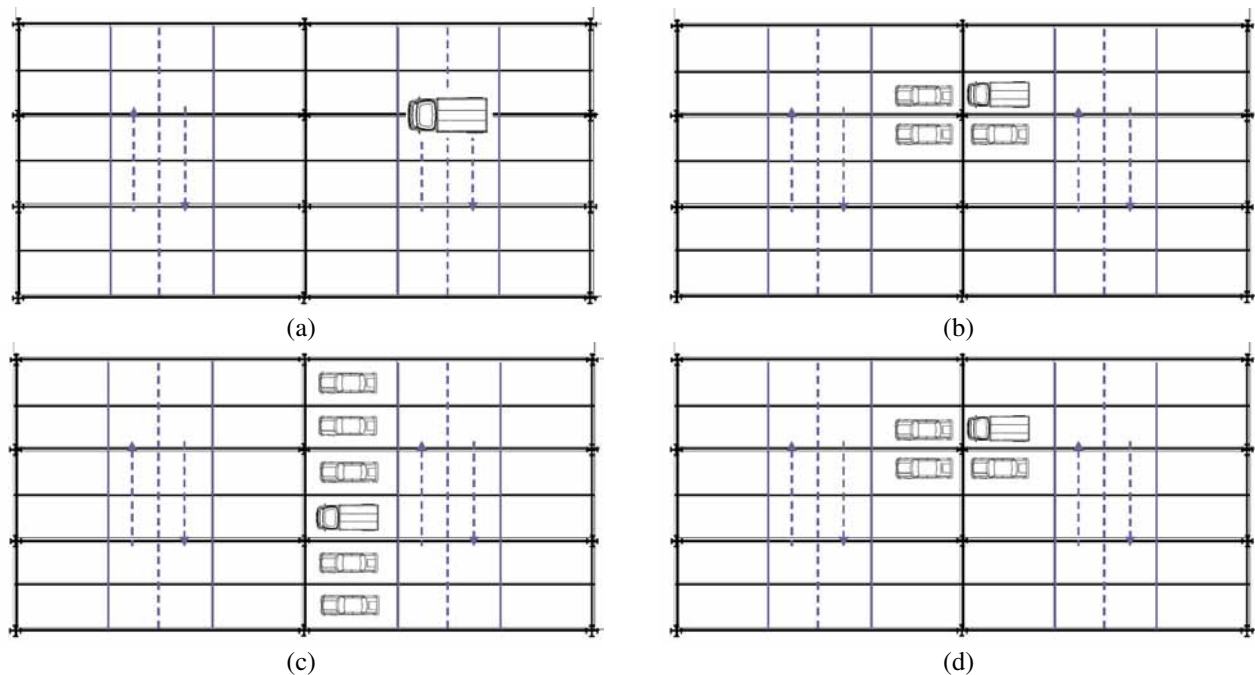


Figura 20 - Scenari di incendio per la verifica al fuoco

3.3 Risultati delle analisi strutturali in condizioni di incendio

L'analisi delle strutture in condizioni di incendio viene condotta secondo i criteri di calcolo previsti

dalla normativa vigente, in particolare le Norme Tecniche per le Costruzioni [11] e le cosiddette parti fuoco degli Eurocodici [4], [5], [6]. Di seguito si riportano i principali risultati delle analisi svolte per i vari scenari di incendio.

I carichi statici agenti sulla struttura sono stati definiti conformemente alla combinazione di carico eccezionale prevista dalle Norme Tecniche per le Costruzioni” [11].

Le analisi termiche ed il modello strutturale agli elementi finiti sono stati eseguiti con il programma di calcolo SAFIR [19]. La struttura portante del prototipo realizzato è stata modellata per mezzo di elementi beam e shell, in particolare il solaio con elementi shell di caratteristiche equivalenti a quelle reali, mentre travi e colonne con elementi beam. In figura 21 è riportato il modello della struttura con indicati i vincoli, interni ed esterni, e la distribuzione dei carichi.

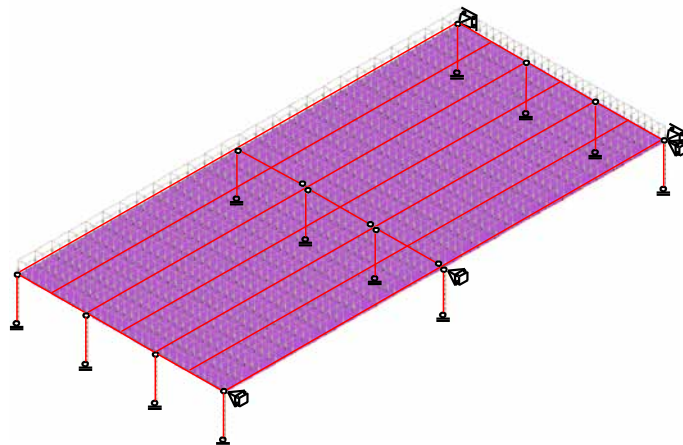


Figura 21 – Modello di calcolo della struttura

Per quanto riguarda lo scenario di incendio di progetto di tipo 1, con il veicolo commerciale, il risultato dell’analisi termo-meccanica effettuata evidenzia che la struttura resiste per tutta la durata dell’incendio di progetto (figura 22).

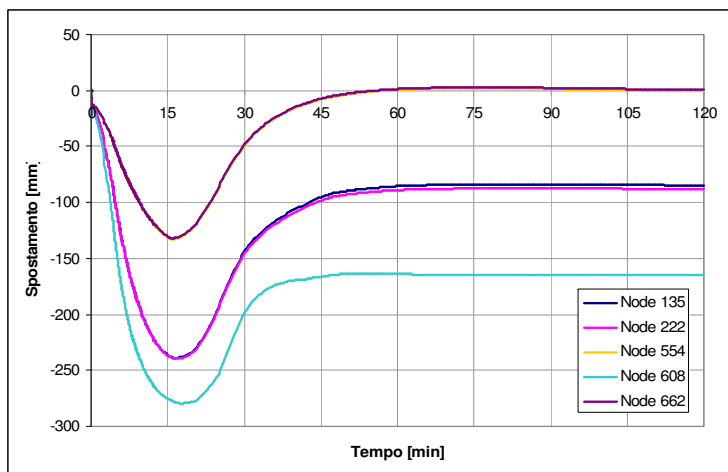


Figura 22 - Scenario di incendio 1: spostamenti verticali delle travi secondarie.

Lo scenario di incendio di progetto di tipo 2 costituisce una condizione particolarmente gravosa per la colonna centrale circondata da quattro auto: l’analisi termo-meccanica permette di evidenziare il raggiungimento della condizione di crisi per instabilità della colonna centrale più prossima all’incendio, che si verifica dopo circa 23 min di esposizione all’incendio (figura 23).

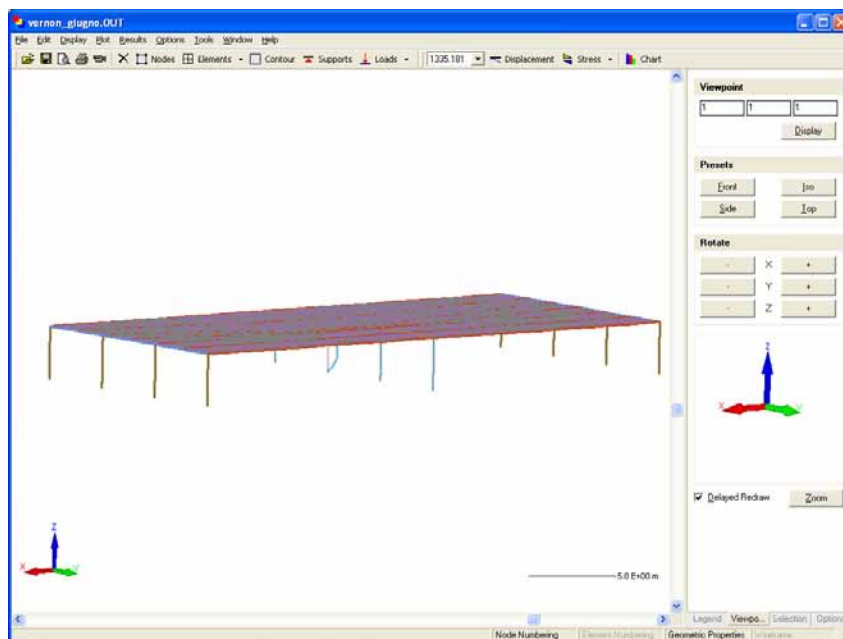


Figura 23 - Scenario di incendio 2 - Deformata strutturale al momento della rottura.

Anche la verifica dello scenario di incendio di progetto di tipo 4, rivolta alle colonne laterali, porta alla condizione di crisi per instabilità della colonna più prossima all'incendio. Pertanto, al fine di garantire la sicurezza strutturale per tutta la durata dell'incendio di progetto, la struttura deve essere riprogettata: le colonne di acciaio vengono trasformate in sistema composto acciaio-calcestruzzo del tipo con profilo parzialmente rivestito di calcestruzzo (*partially encased*).

La nuova struttura con le colonne composte è stata poi sottoposta agli scenari di incendio contenenti il veicolo commerciale (scenari di tipo 2', di tipo 3' e di tipo 4'), in quanto più gravosi; lo scenario di incendio di progetto di tipo 1 non è stato ripetuto, in quanto è evidente che, essendo già verificato con la precedente conformazione strutturale, continua ad esserlo anche con le colonne rivestite. La struttura con le colonne di tipo composto acciaio-calcestruzzo non manifesta situazioni di collasso per tutta la durata degli incendi, comprese le fasi decrescenti, relativamente a ciascuno scenario di incendio di progetto; per completezza si riportano anche i diagrammi degli spostamenti in mezzeria delle travi per gli scenari di incendio di progetto di tipo 2' (figura 24) e di tipo 3' (figura 25).

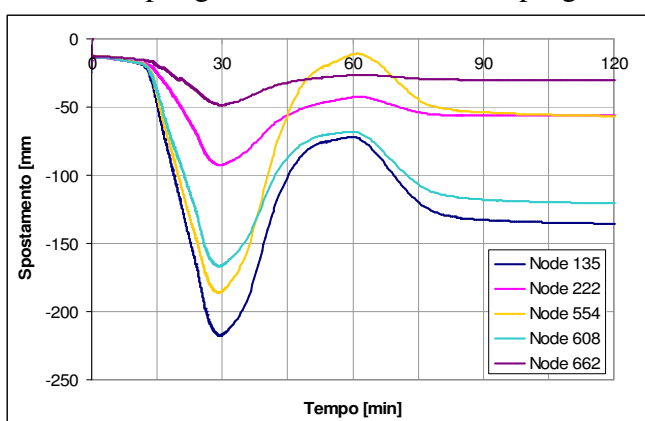


Figura 24 - Scenario di incendio 2': spostamenti verticali travi secondarie

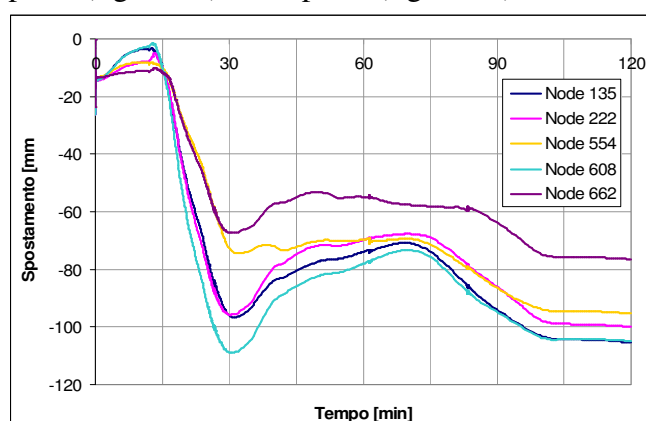


Figura 25 - Scenario di incendio 3'- Spostamenti verticali travi secondarie

La verifica strutturale viene quindi conclusa, avendo controllato che la configurazione strutturale definita garantisce l'assenza di crolli per tutta la durata di ognuno degli scenari di incendio di progetto, comprendente anche la fase di raffreddamento fino al ritorno a temperatura ambiente, così come richiesto dagli obiettivi di sicurezza fissato al paragrafo 3.1.

3.4 Verifica per esposizione alla curva di incendio standard

Secondo quanto riportato al punto 4.2, comma 3, dell'allegato al D.M. 9 maggio 2007 [10], qualora il progettista opti per l'approccio prestazionale deve essere comunque eseguita la verifica della capacità portante degli elementi costruttivi rispetto all'azione termica della curva di incendio nominale standard, determinando le classi di resistenza richieste in funzione del carico d'incendio specifico di progetto ($q_{f,d}$), valutato secondo quanto prescritto nel D.M. 9 marzo 2007 [9]. In questo caso occorre fare riferimento alla Tabella 5 di quest'ultimo decreto (tabella di correlazione tra carico di incendio specifico di progetto e classe minima di resistenza richiesta – vedi tabella 3), in cui le prestazioni minime richieste, a parità di carico di incendio specifico di progetto, sono inferiori rispetto a quanto richiesto nell'applicazione dell'approccio prescrittivo (Tabella 4 del D.M. 9 marzo 2007 [9]).

Questa verifica viene condotta facendo riferimento, come previsto dal D.M. 09/03/07, al valore del carico di incendio che, per la specifica attività, ha una probabilità di superamento inferiore al 20%. Per la determinazione di questo dato si è fatto riferimento alla "Consistenza del Parco Autoveicoli secondo l'Alimentazione e la Cilindrata" circolante in Italia alla data 31/12/2008, ricavato da fonte A.C.I. – Statistiche Automobilistiche (maggiori dettagli sono in [27]).

La ricerca [13] ha evidenziato come il potere calorifico degli autoveicoli sia fortemente influenzato dalla capacità volumetrica del serbatoio dell'autovettura. Con riferimento ai dati della Tabella 2, le automobili attualmente circolanti in Italia si classificano come autoveicoli di categoria inferiore o uguale alla Classe 3 quelli aventi una cilindrata inferiore o uguale a 2000 cc, mentre quelli di cilindrata superiore appartengono alle Classi 4 o 5. Sulla base di questi dati risulta che la percentuale di autoveicoli equiparabili alla Classe 4 o 5 attualmente circolanti in Italia è pari a 7.25% del totale del parco autoveicoli. Così, facendo riferimento ad un carico specifico di progetto corrispondente alla presenza in tutto il parcheggio di autovetture di Classe 3, si ottiene $q_{f,d} = 436 \text{ MJ/m}^2$. Pertanto, secondo quanto riportato nella Tabella 5 del D.M. 09/03/07, indipendentemente dai risultati ottenuti con l'approccio ingegneristico, è necessario in ogni caso garantire una classe minima di resistenza al fuoco pari a 15 minuti.

Questo criterio di verifica è puramente convenzionale e non fornisce alcuna indicazione nel caso di uno scenario di incendio di tipo localizzato. Nel caso delle autorimesse aerate la corretta valutazione degli scenari di incendio più pericolosi per la struttura portante deve prevedere anche gli effetti di incendi di tipo localizzato. Pertanto, al di fuori di una valutazione condotta secondo un approccio prescrittivo, risulta necessario condurre la valutazione della sicurezza in caso di incendio delle strutture basandosi sui metodi di calcolo previsti dalla parte fuoco dell'Eurocodice 1 [4], come fatto nel paragrafo 3.3.

Carichi d'incendio specifici di progetto ($q_{f,d}$)	Classe
Non superiore a 300 MJ/m ²	0
Non superiore a 450 MJ/m ²	15
Non superiore a 600 MJ/m ²	20
Non superiore a 900 MJ/m ²	30
Non superiore a 1200 MJ/m ²	45
Non superiore a 1800 MJ/m ²	60
Non superiore a 2400 MJ/m ²	90
Superiore a 2400 MJ/m ²	120

Tabella 3 - Tabella 5 D.M. 9 marzo 2007

Di conseguenza la medesima struttura analizzata con l'approccio ingegneristico è stata verificata anche mediante un'analisi semplificata per singoli elementi, secondo un approccio di tipo prescrittivo. Tale metodo consiste nello schematizzare la struttura come tanti elementi singoli, travi e colonne, assemblati tra loro e calcolando la resistenza al fuoco dell'intera struttura come il

minimo tempo di collasso dei vari elementi strutturali che la compongono quando essi sono sottoposti alla curva di incendio standard.

Facendo riferimento al telaio piano di Figura 26, estrapolato dall'intera struttura, appartenente alla fila 2, e ad una trave principale centrale con schema statico di trave appoggiata-appoggiata, sono stati ottenuti, applicando sempre il codice di calcolo SAFIR, i campi termici prodotti dalla curva di incendio tempo-temperatura standard, riportata nell'Eurocodice 1 Parte1-2 [4].

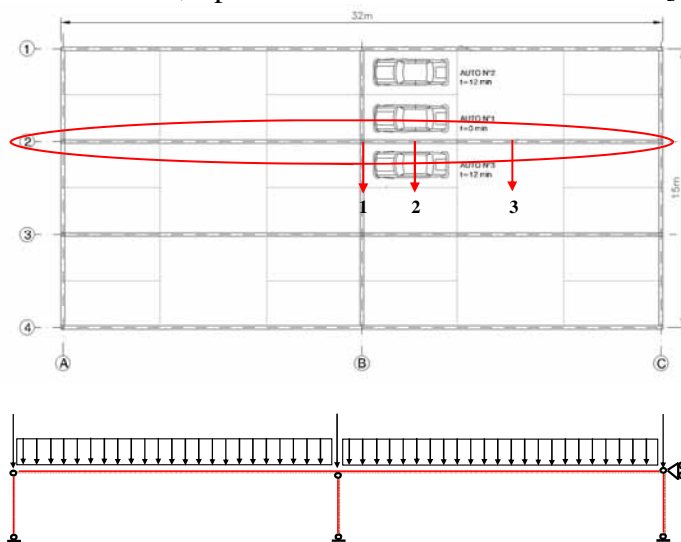


Figura 26 - Particolare del telaio esaminato e relativo schema statico.

La verifica degli elementi strutturali può essere quindi condotta con i metodi previsti per le strutture composte acciaio-calcestruzzo [6]. Nel presente lavoro, per una più chiara valutazione delle soluzioni strutturali, la verifica è condotta applicando il metodo del momento-curvatura [21]. E' stato determinato per le travi l'andamento del momento resistente nel tempo che è stato confrontato con la sollecitazione flessionale presente all'inizio del transitorio termico, causata dalla combinazione di carico quasi permanente (figura 27, figura 28, figura 29). Dalle figure che seguono si evince che le travi principali appartenenti alla linea centrale della struttura presentano un tempo di resistenza al fuoco pari a 24 min; invece, le travi secondarie hanno un tempo di resistenza al fuoco di 20 min (in riferimento alle zone a momento negativo).

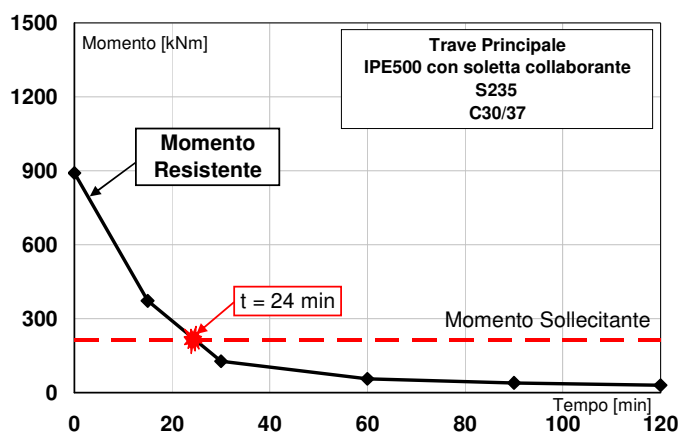


Figura 27 - Andamento del momento resistente positivo nel tempo della trave principale centrale.

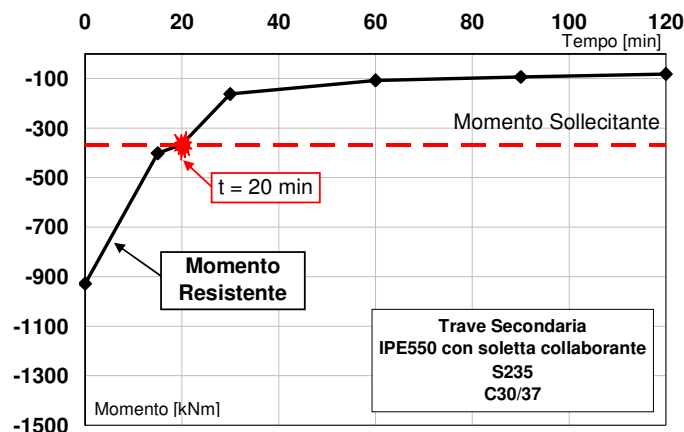


Figura 28 - Andamento del momento resistente nel tempo della trave secondaria con fibre tese superiori.

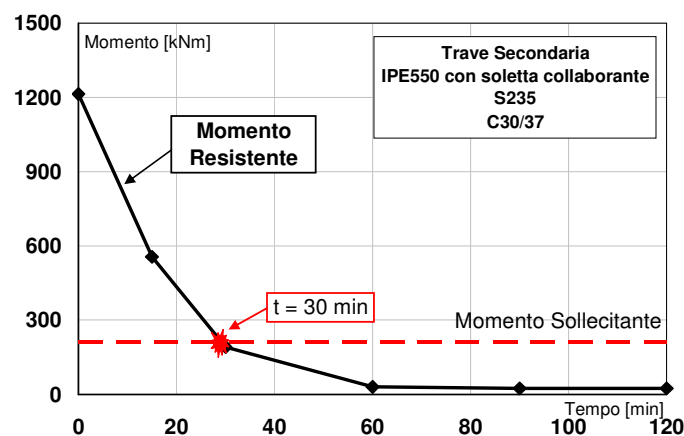


Figura 29 - Andamento del momento resistente nel tempo della trave secondaria con fibre tese inferiori.

Per quanto riguarda le colonne, sono stati determinati i domini di resistenza momento-sforzo assiale allo S.L.U. al variare delle temperature in presenza degli effetti del secondo ordine e delle imperfezioni (figura 30). Si nota come la classe di resistenza al fuoco minore è garantita dalla colonna centrale ed è pari a 60 minuti.

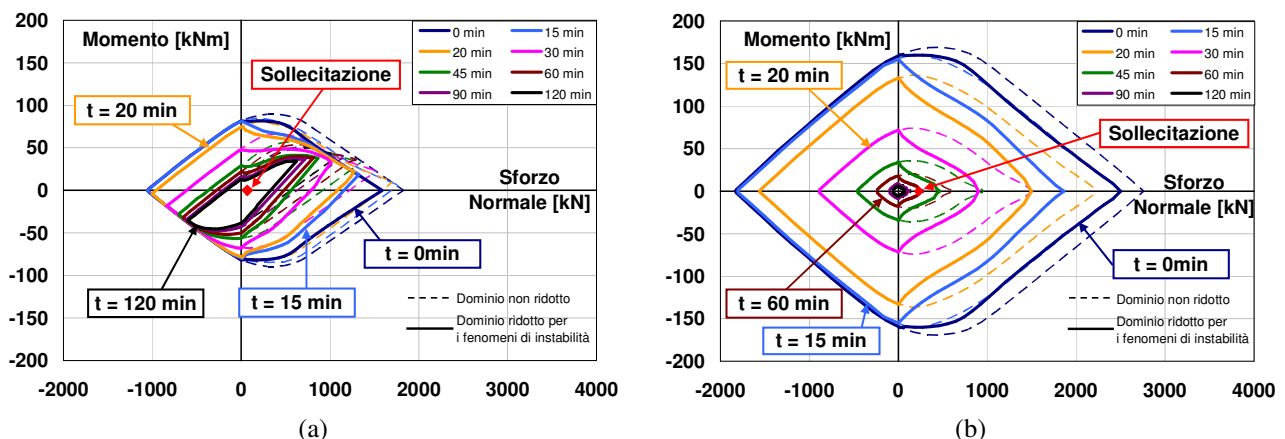


Fig. 30 - Verifica della resistenza delle Colonne: a) Colonne laterali; b) Colonne centrali.

In definitiva, anche l'ulteriore verifica nei confronti dell'incendio standard, prevista dal punto 4.2 dell'allegato al D.M. 9/05/07 [10], risulta soddisfatta in quanto dall'analisi semplificata per singoli elementi si verifica che la struttura ha un tempo di resistenza al fuoco di 20 min.

4. Conclusioni

La Direttiva del 21 Dicembre 1988 del Consiglio della Comunità Europea (Construction Product Directive 89/106/CEE, 1988, [1]) ha determinato un'evoluzione del quadro normativo vigente nei Paesi membri, che oggi sono regolati da norme tecniche per le costruzioni tra essi concordate e armonizzate. In particolare è stata definita una nuova procedura, basata su un approccio ingegneristico o prestazionale, per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio, la cui applicazione in Italia è regolata dal D.M. 09/05/07, che si affianca alla tradizionale procedura basata sull'approccio prescrittivo.

Attraverso un'importante campagna di ricerca [13], condotta nell'ambito dei progetti finanziati dalla Comunità Europea, questa procedura è stata messa a punto e verificata sperimentalmente su una tipologia di costruzione che più di altre si adatta alla sua applicazione, i parcheggi aerati. Queste costruzioni infatti, per le loro caratteristiche costruttive e di esercizio, si prestano bene alla definizione dei cosiddetti scenari di incendio, ossia i più pericolosi eventi per la stabilità strutturale che possono essere previsti nell'esercizio dell'edificio oggetto della progettazione.

Nel presente contributo sono stati analizzati i risultati della ricerca europea, verificando in particolare gli aspetti legati al comportamento termo-meccanico in condizioni di incendio delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo, e le procedure messe a punto per l'applicazione dell'approccio ingegneristico a questa tipologia di costruzioni. Di seguito sono riepilogate le principali conclusioni di tali analisi:

1. Le autovetture oggi circolanti forniscono un contributo all'incendio più elevato rispetto a quanto riportato dai dati bibliografici risalenti agli scorsi anni '80. Ciò probabilmente è dovuto all'evoluzione che hanno subito le automobili negli ultimi decenni, sia per quanto riguarda le dimensioni che il numero e la combustibilità di molti accessori, oggi diffusamente presenti anche sulle utilitarie. I risultati della ricerca hanno fornito una classificazione delle autovetture in 5 categorie, in funzione del potere calorifico.
2. Oltre ai dati relativi al rilascio termico dovuto alla combustione di una o più autovetture, i risultati della ricerca hanno permesso di definire in forma analitica gli scenari di incendio più pericolosi per la stabilità strutturale. Sulla base di questi risultati, recenti pubblicazioni tecniche (INERIS, 2001, [14]) hanno proposto linee guida per la definizione degli scenari di incendio da considerare nella progettazione strutturale quando si affronta il problema della sicurezza secondo l'approccio ingegneristico. Questo documento può essere un valido riferimento anche in ambito nazionale per l'applicazione dell'approccio ingegneristico al caso delle autorimesse aerate.
3. Le prove sperimentali di incendio in scala reale hanno permesso di testare il comportamento strutturale del prototipo costruito con membrature realizzate in acciaio e in soluzione composta acciaio-calcestruzzo. In particolare, per ognuno degli scenari di incendio sperimentati, è sempre stata verificata la condizione che le norme vigenti pongono come obiettivo della verifica della sicurezza strutturale in caso di incendio: il mantenimento della stabilità strutturale per tutta la durata dell'incendio, compresa la fase di raffreddamento fino al ritorno a temperatura ambiente.
4. Le valutazioni analitiche condotte sulle configurazioni di progetto definite dalle normative vigenti sono risultate coerenti con il comportamento degli elementi strutturali verificato durante i test sperimentali, portando a risultati complessivamente a vantaggio di sicurezza.
5. I criteri di calcolo previsti dalle normative vigenti, in particolare le cosiddette parti fuoco degli Eurocodici [4], [5], [6], consentono di verificare il raggiungimento di tale obiettivo. Anche gli effetti di eventi di incendio previsti dalle normative al fine di incrementare i livelli di sicurezza delle costruzioni, come il camioncino commerciale previsto dalla linea guida [14], possono essere adeguatamente valutati. Il comportamento strutturale è analizzato sull'intera struttura, permettendo di individuare quegli elementi strutturali che non sono sufficientemente resistenti per consentire il raggiungimento dei requisiti di sicurezza in caso di incendio. Ad esempio, nel caso studio esaminato, la richiesta di verifica della combustione del camioncino commerciale nell'ambito degli scenari di progetto ha reso necessario il sovradimensionamento delle colonne

dell'edificio. L'analisi viene conclusa con l'ottenimento della configurazione strutturale che garantisce assenza di crolli per tutta la durata degli scenari di incendio di progetto.

6. L'applicazione dell'approccio ingegneristico ha permesso di dimostrare che, per questa tipologia di edifici e per l'attività in essi prevista, l'adozione di una struttura di acciaio e/o composta acciaio-calcestruzzo, purché opportunamente dimensionata secondo i criteri di calcolo previsti dalle normative vigenti, consente di raggiungere gli obiettivi di sicurezza in condizioni di incendio anche senza il ricorso a specifici sistemi protettivi delle parti di acciaio esposte all'incendio.

Queste conclusioni hanno consentito l'evoluzione delle più recenti regolamentazioni emanate alla luce del nuovo quadro normativo Europeo. Come ad esempio i due nuovi decreti (Arrête du 1 Mars 2004 [3] e Arrête du 9 Mai 2006 [7]) che regolano la progettazione strutturale delle autorimesse aerate in Francia, secondo cui le strutture portanti possono essere progettate seguendo due procedure alternative:

- un approccio prescrittivo, che prevede una resistenza al fuoco minima delle strutture portanti R60 per gli edifici monopiano e R90 per gli edifici multipiano, valutata nelle condizioni di esposizione all'incendio nominale (incendio standard ISO 834);
- un approccio ingegneristico, che prevede la verifica del mantenimento della stabilità della struttura portante dell'edificio per tutta la durata degli incendi di progetto (che richiedono specifica approvazione da parte della locale autorità di controllo), compresa la fase di raffreddamento fino al ritorno a temperatura ambiente.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è frutto delle attività condotte dalla Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, istituita da Fondazione Promozione Acciaio, in particolare nell'ambito dell'Attività n. 9, "Autorimesse aperte fuori terra". Si ringrazia ArcelorMittal per la collaborazione ed il supporto prestati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Commissione della Comunità Europea, "Direttiva sui prodotti da costruzione" 89/106/CEE, 21 maggio 1988.
- [2] Commissione della Comunità Europea, Documento Interpretativo n. 2 di 89/106/CEE "Requisiti essenziali della sicurezza in caso di incendio" ottobre 1993.
- [3] Arrête (2004), "Relatif à la résistance au feu des produits, élément de construction et d'ouvrages" Ministère de l'Intérieur, de la Sécurité Intérieur et des Liberté Locales, 1 Mars 2004.
- [4] UNI EN 1991-1-2 (2004), "Azioni sulle strutture. Parte 1-2: Azioni in generali – Azioni sulle strutture esposte al fuoco", Ottobre 2004.
- [5] UNI EN 1993-1-2 (2005), "Progettazione delle strutture di acciaio. Parte 1-2:Regole generali – progettazione strutturale contro l'incendio", Luglio 2005.
- [6] UNI EN 1994-1-2 (2005), "Progettazione delle strutture composte acciaio e calcestruzzo. Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio", Ottobre 2005.
- [7] Arrête (2006), "Règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les parcs de stationnement couverts", Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du Territoire 9 Mai 2006.
- [8] D. MIN. INT. (16-02-2007), "Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione", GU n. 74 del 29 marzo 2007
- [9] D. MIN. INT. (9-03-2007), "Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco", GU n. 74 del 29 marzo 2007.

- [10] D. MIN. INT. (09-05-2007), “Direttive per l’attuazione dell’approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio”, Ministero dell’Interno 9 maggio 2007.
- [11] D. MIN. II.TT. (2008), Norme Tecniche per le Costruzioni, supplemento Ordinario della G.U. N° 29 del 04/02/ 2008.
- [12] Franssen J.M., Cadorin J.F., Cajot L.G., Joyeux, D., Pustorino S., Van Oerle J. (1999), “Natural fire safety concept” Part.1: WG1 “Natural Fire Models” – CEC Agreement 7210 – SA/125, ..., March 1999
- [13] CEC Agreement 7215 - PP/025 (2001), “*Demonstration of Real Fire Tests in Car Parks and High Buildings*”, Ricerca condotta dal CITCM (Francia), PROFIL-ARBED Recherches (Lussemburgo) e TNO (Paesi Bassi), conclusa nel 2001
- [14] INERIS (2001), “Parcs de stationnement en superstructure largement ventiles. Avis d’expert sur les scénarios d’incendie”, Ottobre 2001.
- [15] Nigro E. (2001), “Verifica delle strutture composte acciaio-calcestruzzo in caso d’incendio: sperimentazione, modelli di calcolo, indicazioni normative” *Costruzioni Metalliche* 2001 (4): 49-66.
- [16] Elifani G., Gioni G. - *La prevenzione incendi nell’industria e nell’artigianato* (2003), EPC Libri Srl - Roma
- [17] Pustorino S. (2006), “Sicurezza incendio”, Edizioni ETS, Milano, 2006.
- [18] Cirillo V. (2007), “Resistenza al fuoco delle strutture: nuove disposizioni nazionali” – *Rivista Antincendio* – Aprile 2007 .
- [19] Franssen J.M., (2007) - “User Manual for SAFIR2007: A Computer Program for Analysis of Structures Submitted to the Fire”. University of Liege 2007, Belgium.
- [20] Gioni G., Cirillo V., (2007), “Novità nella resistenza al fuoco” - *Rivista Obiettivo Sicurezza* - Marzo-Aprile 2007.
- [21] Nigro E., Cefarelli G. (2007), “Procedura generale e metodi semplificati per la verifica in caso di incendio di travi composte acciaio-calcestruzzo”. XXI Congresso CTA “Costruire con l’acciaio” Catania, Ottobre.
- [22] Nigro E., Ferraro A., Cefarelli G. (2008), “Structural fire analysis of composite steel and concrete frames” (in Italian), *Costruzioni Metalliche*, n. 6, December 2008, ACAI, pp. 51-64.
- [23] Zhao B. (2008), “Progetto DIFISEK Parte 3: Comportamento meccanico in condizioni di incendio” Seminario organizzato a conclusione del progetto di ricerca europeo: Dissemination of Fire Safety Engineering Knowledge, Roma, Dicembre
- [24] Nigro E., Ferraro A., Cefarelli G. (2009), “Valutazione della sicurezza in caso di incendio di strutture composte acciaio-calcestruzzo – Parte II: Analisi di sottostrutture”, XXII Congresso CTA “Costruire con l’acciaio”, Padova, settembre.
- [25] Nigro E., Pustorino S., Cefarelli G., Princi P. (2010), *Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio*, Ed. Hoepli, Milano.
- [26] Pustorino S., Princi P., Report tecnico “Sicurezza strutturale in caso di incendio di parcheggi multipiano fuori terra realizzati con ampia ventilazione naturale e struttura portante in acciaio” Attività n. 9 “Autorimesse aperte fuori terra” della Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio.
- [27] S. Pustorino, P. Princi, E. Nigro, A. Ferraro, M. Caciolai, V. Cirillo, (2010), *Approccio ingegneristico per la sicurezza strutturale in caso di incendio di parcheggi aerati realizzati con struttura di acciaio*, Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, Marzo 2010.