L'APPROCCIO INGEGNERISTICO ALLA SICUREZZA STRUTTURALE IN CONDIZIONI DI INCENDIO DI AUTORIMESSE DI EDIFICI CIVILI

Emidio Nigro , Giuseppe Cefarelli , Anna Ferraro

Di.St. – Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II

ABSTRACT

L'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio, noto in ambito internazionale come Fire Safety Engineering (FSE), può essere definita come una multi-disciplina basata sull'applicazione dei principi della scienza e dell'ingegneria agli effetti dell'incendio, al fine di salvaguardare la vita umana e tutelare i beni immobili e le proprietà attraverso la quantificazione del rischio di incendio e l'individuazione di adeguate misure di protezione e prevenzione.
Nel presente lavoro gli aspetti peculiari della Fire Safety Engineering (FSE) per la verifica delle strutture in caso di incendio vengono descritti con riferimento alle vigenti norme nazionali (Norme Tecniche per le Costruzioni, 2008; Decreti del Ministero dell'Interno del 2007, Norme Tecniche di Prevenzione Incendi D.M.Int. 03/08/2015, chiamato nel seguito anche Codice di Prevenzione Incendi) ed europee (Eurocodici Strutturali). In sintesi, l'applicazione della FSE richiede, tra l'altro, la scelta del livello di prestazione richiesto, la definizione degli scenari d'incendio di progetto, la scelta dei modelli di incendio e di valutazione dei flussi termici e l'analisi termo-meccanica della struttura con modelli di calcolo avanzati.
Particolare attenzione viene, poi, rivolta al caso delle autorimesse aperte ventilate, per le quali, con riferimento alla definizione degli scenari d'incendio di progetto, sono disponibili i risultati di importanti lavori di ricerca teorica e sperimentale condotti in ambito europeo, che sono alla base della recente pubblicazione della nuova Regola Tecnica Verticale (RTV) sulle autorimesse riportata nel capitolo V6 del Codice di Prevenzione Incendi (D.M.Int. 21/02/2017). Le informazioni fornite dalle suddette ricerche, e riprese come detto nella recente RTV sulle autorimesse, sono state utilizzate già nell'anno 2009 per l'applicazione della FSE al caso studio delle autorimesse, caratterizzate dalla presenza di colonne portanti di acciaio a sostegno di una sovrastruttura isolata sismicamente, collocate al piano terra degli edifici realizzati nell'ambito del Progetto C.A.S.E. per L'Aquila. Il caso studio reale esposto di seguito rappresenta in sostanza una sintesi dell'attività di consulenza tecnica svolta dagli autori, ai sensi del D.M.09/05/2007, tra ottobre e dicembre 2009, nell'ambito della procedura di richiesta di deroga per il rilascio del Certificato di Prevenzione Incendi.

KEYWORDS
Fire Safety Engineering, Scenari di incendio, Autorimesse aerate, Strutture di acciaio, Analisi termo-meccanica

1 INTRODUZIONE

La sicurezza degli edifici in caso d'incendio dipende da molti fattori che intervengono in fase di progetto e durante la costruzione dell'opera stessa. Con il termine sicurezza s'intende l'insieme di disposizioni normative, di accorgimenti progettuali e di specifiche procedure finalizzate alla salvaguardia della vita umana e dei beni immobili e della proprietà. Tali procedure definiscono un insieme integrato di metodi di prevenzione, protezione attiva e passiva. Il quadro normativo Italiano in materia di prevenzione incendi è in continua evoluzione con l'obiettivo di dare una maggiore responsabilità ai Professionisti Antincendio.

Nel 2007, il Ministero degli Interni ha emanato importanti decreti che hanno modificato, come è ben noto, l'approccio metodologico della verifica di sicurezza strutturale in caso d'incendio. In particolare, per quanto concerne la verifica di resistenza al fuoco nel 2007 sono stati emanati tre decreti: D.M. Int. del 16-02-2007, "*Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione*" [1]; D.M. Int. del 09-03-2007, "*Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei Vigili del Fuoco*" [2], con il quale è stata definitivamente abrogata la ormai obsoleta circolare n. 91 del 1961; D.M. Int. del 09-05-2007, "*Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio*" [3].

Quest'ultimo decreto ha normato per la prima volta in Italia l'approccio ingegneristico (prestazionale) alla sicurezza antincendio; noto, in ambito internazionale, come *Fire Safety Engineering* (FSE), la cui applicazione è basata su una valutazione della sicurezza di tipo prestazionale, fondata, nello specifico, non su limiti normativi di tipo prescrittivo, come ad esempio la massima durata di esposizione all'incendio nominale, ma sul raggiungimento di determinati livelli prestazionali in presenza di scenari d'incendi di progetto specifici dell'attività, consentendo di conseguenza una maggiore libertà nelle scelte progettuali ed una maggiore aderenza, delle misure di sicurezza adottate, al rischio d'incendio specifico della costruzione.

Nell'attuale quadro normativo, l'approccio prestazionale della FSE non si sostituisce all'approccio prescrittivo, ma i due coesistono; le soluzioni tecniche fissate dall'approccio prescrittivo rimangono una delle possibili strade che il progettista può scegliere di seguire per soddisfare gli obiettivi di sicurezza richiesti.

L'evoluzione normativa è continuata, prima con l'emanazione del D.P.R.151/2011 [4], che individua le attività soggette alla disciplina della prevenzione incendi (abroga il D-M.Int. 16/02/1982) ed opera una sostanziale semplificazione relativamente agli adempimenti da parte dei soggetti interessati, e più recentemente con l'emanazione delle Norme Tecniche di Prevenzione Incendi, D.M.Int.03/08/2015 (detto anche "Codice di prevenzione incendi", [5]); tale codice ad oggi, in questa sua prima fase di emanazione, non sostituisce i precedenti decreti, ma si affianca ad essi come normativa volontaria e, a differenza della normativa preesistente, si presenta come una normativa di tipo prestazionale a 360°.

Con riferimento all'attività di autorimessa, in particolare, il codice, a seguito dell'emanazione del D.M.Int. 21/02/2017 (Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi per le attività di autorimessa, [6]) contiene, nel capitolo V.6 - Attività di autorimessa, le specifiche di riferimento per l'applicazione dell'approccio prestazionale ai sensi del Codice PI senza l'avvio dell'Istanza di Deroga (disciplinata dal DPR.151/2011, [4]) a partire dal 02/04/2017, data di entrata in vigore del citato decreto. In particolare, la nuova Regola Tecnica Verticale riprende i risultati di importanti lavori di ricerca teorica e sperimentale condotti in ambito europeo sugli incendi interessanti le autorimesse ([7], [8]) e già riportati all'interno di uno studio sviluppato dalla Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni in Acciaio in Caso di Incendio (promossa dalla Fondazione Promozione Acciaio) in collaborazione con Arcelor-Mittal nel 2008 ([9], [10], [11], [12]). Le informazioni fornite dalle suddette ricerche, e riprese come detto nella recente RTV sulle autorimesse, sono state utilizzate già nell'anno 2009 per l'applicazione della FSE al caso studio delle autorimesse collocate al piano terra degli edifici realizzati nell'ambito del Progetto C.A.S.E. per L'Aquila.

Pertanto, nel seguito si riporta una sintesi dell'attività di consulenza tecnica svolta dagli autori, tra ottobre e dicembre 2009, per la valutazione della resistenza strutturale in caso d'incendio nell'ambito della Richiesta di Deroga (ai sensi dell'allora vigente D.P.R. n. 37 del 12/01/1998) per il rilascio del Certificato di Prevenzione Incendi delle autorimesse collocate al piano terra degli edifici realizzati nell'ambito del Progetto C.A.S.E. per L'Aquila. Si sottolinea che, tale procedura, sebbene svolta nell'anno 2009, risulta, per la parte relativa alle "autorimesse aerate", conforme al recente D.M.Int. 21/02/2017 [6].
L'attività "*autorimessa*" rientrava nell'attività n.92 dell'allora vigente D.M.Int. 16 febbraio 1982 [11] (corrispondente all'attività 75 del vigente D.P.R. 151/2011 [4]) ed era soggetta a regola tecnica verticale di tipo prescrittivo con il D.M.Int. 1 febbraio 1986 [14]. Quest'ultima, tra l'altro ancora vigente, prescrive che le strutture portanti delle autorimesse non isolate devono garantire almeno una classe di resistenza al fuoco R90 (ovvero una resistenza di 90 minuti all'esposizione all'incendio nominale, con riferimento alla curva standard detta anche ISO834). Tuttavia, nel caso in esame di colonne portanti di acciaio a sostegno della sovrastruttura isolata sismicamente, l'ottenimento della classe di resistenza al fuoco R90 necessita dell'adozione di rivestimenti protettivi delle colonne di acciaio, per i quali è richiesta una manutenzione continua. Infatti, si ritiene elevata la possibilità di un danneggiamento accidentale dei rivestimenti protettivi a causa di impatti con le autovetture in manovra nell'area di parcheggio. A questo si aggiunge la possibilità di danneggiamenti per atti vandalici, visto che le autorimesse sono facilmente accessibili e non controllate. Le incertezze sull'efficacia della necessaria manutenzione e il corrispondente onere economico possono rendere, in tali casi, sconsigliabile l'uso di rivestimenti protettivi. Pertanto, nell'ipotesi di assenza di rivestimenti protettivi, la sicurezza strutturale durante l'incendio è stata verificata attraverso l'applicazione dell'approccio prestazionale, che consente di valutare in maniera più completa ed affidabile la risposta termo-meccanica della struttura con riferimento agli scenari di incendio che possono realisticamente verificarsi.
Tale applicazione è stata sviluppata ai sensi del D.M.Int. 09/05/2007 [3], all'epoca unico strumento normativo disponibile in Italia per l'applicazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio, ma come già detto risulta comunque conforme al Codice di Prevenzione Incendi [5]. In particolare la metodologia proposta per la selezione degli scenari d'incendio di progetto relativamente alle "autorimesse aerate", è attualmente riportata nella RTV 6, D.M.Int. 21/02/2017 [6]; per quanto concerne la selezione degli scenari d'incendio per le autorimesse chiuse si riportano nel prosieguo le scelte progettuali adottate per il caso studio sulla base delle caratteristiche geometriche ed architettoniche delle autorimesse oggetto di studio, conformemente alle indicazioni del D.M.Int. 09/05/2007 e della letteratura tecnica di riferimento a cui rimanda lo stesso decreto; concetti e bibliografia di riferimento che sono attualmente inseriti nella sezione M del Codice di Prevenzione Incendi [5].

2 APPLICAZIONE DELLA FIRE SAFETY ENGINEERING NELLA PROGETTAZIONE STRUTTURALE

L'approccio prescrittivo alla sicurezza strutturale in condizioni di incendio consiste nel determinare la resistenza della struttura in caso di incendio in termini di tempo massimo di esposizione all'incendio di tipo convenzionale (generalmente curva di incendio tempo-temperatura standard, detta anche curva ISO834) e verificare che sia superiore al valore limite richiesto determinato in funzione del carico di incendio di progetto. Tale metodo può talvolta risultare antieconomico ed eccessivamente a vantaggio di sicurezza, in quanto gli effetti termici prodotti dall'incendio standard, che è una curva temperatura-tempo sempre crescente, risultano più gravosi di quelli di un incendio reale, che, come è noto, è costituito da una fase crescente (incendio generalizzato) seguita da un ramo decrescente (estinzione).

L'approccio prestazionale, a differenza di quello prescrittivo, si basa su un'analisi dettagliata del comportamento strutturale mediante modelli di analisi avanzati che tengono conto delle non linearità sia del problema termico che del problema meccanico.
Attraverso il metodo ingegneristico è, quindi, possibile valutare in modo completo la sicurezza in caso di incendio di una costruzione, seguendo i passi riportati nel Layout di Figura 1. In particolare vanno definiti in modo opportuno:

1) il rischio di innesco dell'incendio in funzione della destinazione d'uso (tipologia di carico di incendio e quantità e tipo di utenti) e la presenza, il tipo e l'efficacia di misure di protezione attiva, sistemi di rilevazione, di allarme e di estinzione;
2) i possibili scenari di incendio di progetto e lo sviluppo dell'incendio stesso in funzione delle caratteristiche geometriche e delle condizioni di ventilazione del compartimento e della tipologia e quantità di carico di incendio di progetto.

Seguendo i passi indicati nel Layout di Figura 1, si riporta di seguito l'applicazione del metodo ingegneristico al caso studio delle autorimesse collocate al piano terra degli edifici realizzati nell'ambito del Progetto C.A.S.E. per L'Aquila. Ulteriori dettagli sull'impostazione generale dell'approccio ingegneristico alla sicurezza strutturale in caso di incendio sono contenuti in Nigro *et al.* [15].

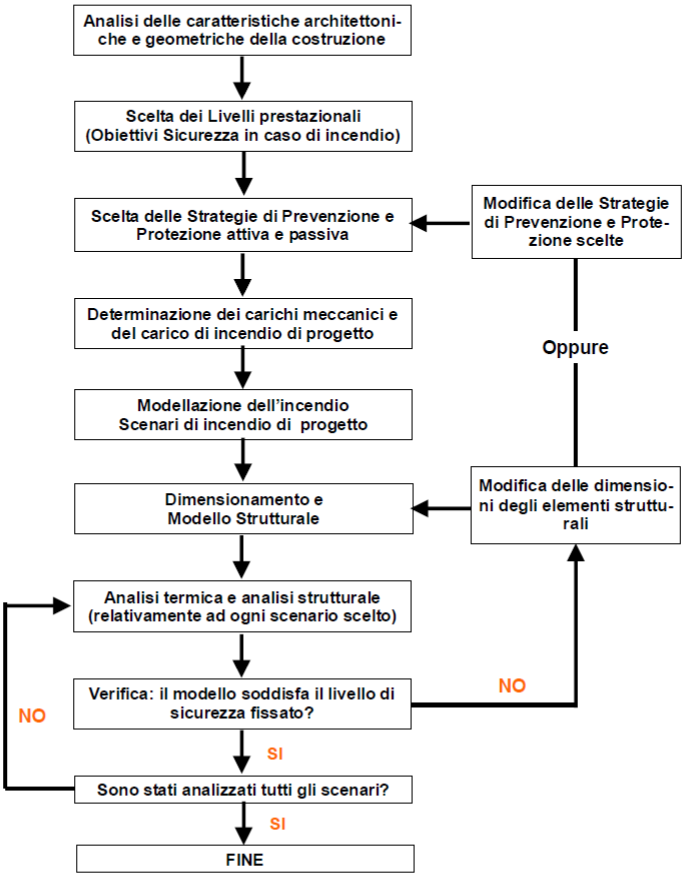


Figura 1. Layout generale dell'analisi della sicurezza in caso di incendio di una costruzione.

3 CASO STUDIO: AUTORIMESSE DEL PROGETTO C.A.S.E. PER L'AQUILA

3.1 Descrizione dell'edificio: Analisi delle caratteristiche della costruzione

Ciascun edificio residenziale è costruito su una piastra sismicamente isolata, con dimensioni pari a

circa 21m ×57 m, capace di sostenere un edificio di tre piani con dimensioni in pianta pari a circa 12 m×48 m, oltre le scale (Figura 2).
Gli edifici (sovrastrutture) sono caratterizzati da elementi architettonici e costruttivi diversi e presentano strutture portanti in legno, in calcestruzzo armato o in acciaio. Ciascuna piastra in c.a. isolata, di altezza pari a 50 cm, è sorretta da colonne in acciaio (di altezza 260 cm) con interposti isolatori sismici. In tale zona al di sotto di ciascuna piastra isolata sono contenuti i parcheggi (Figura 3) per circa 34 auto e le distribuzioni impiantistiche. Le colonne sono ripartite su una maglia quadrata di lato 6 m ed hanno la funzione di distribuire le azioni sulla piastra di fondazione in calcestruzzo armato. Le dimensioni in pianta del compartimento autorimessa sono pari a 22m×58m; difatti le pareti perimetrali, quando presenti, risultano sfalsate di 50 cm rispetto alla proiezione verticale del bordo delle piastre isolate.
Le colonne in acciaio delle autorimesse, su cui si concentrano le verifiche di sicurezza di seguito riportate, sono realizzate con un tubo cavo di acciaio caratterizzato dalla presenza di un capitello sommitale, utile per la ripartizione del carico trasferito dall'isolatore sismico interposto tra la colonna e la piastra isolata in c.a. e come struttura di contrasto per le operazioni di sostituzione degli isolatori.
La zona adibita ad autorimessa può essere completamente aperta sui quattro lati ovvero parzialmente chiusa su uno o più lati. Pertanto tra i vari casi esaminati sono presenti sia autorimesse di tipo aerato, sia di tipo quasi completamente chiuso, nonché diverse condizioni intermedie.

Figura 2. Edificio tipico del Progetto C.A.S.E. per L'Aquila.

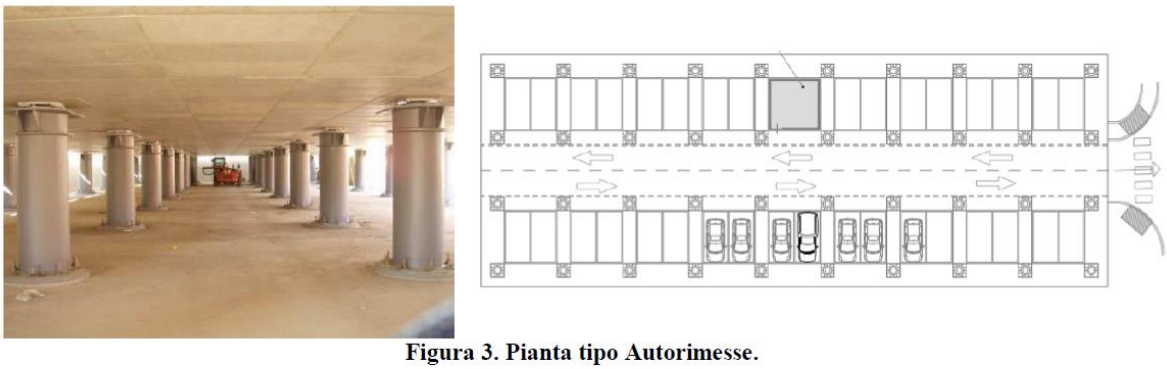


Figura 3. Pianta tipo Autorimesse.

3.2 Scelta dei Livelli Prestazionali e delle Strategie di Prevenzione e Protezione Attiva e Passiva

L'obiettivo della sicurezza antincendio riguarda la *resistenza e la stabilità degli elementi portanti*

principali della zona sottostante ciascuna piastra isolata.
Per raggiungere l'obiettivo prefissato, data la destinazione d'uso delle sovrastrutture (edifici residenziali), è sufficiente fissare il **Livello di prestazione III** (*Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo congruo con la gestione dell'emergenza*), come definito al punto 3 comma 1 dell'Allegato al D.M.Int.09/03/2007 [2]. Tuttavia, al fine di limitare i danni alle costruzioni si assume il **Livello di prestazione IV** (*Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento delle strutture stesse*, punto 3 comma 1 dell'Allegato al D.M.Int.09/03/2007 [2]). Nel caso in esame si è scelto di quantificare il danneggiamento in termini di spostamenti verticali relativi tra la sommità di colonne adiacenti. Al fine di limitare il danneggiamento delle finiture e delle sovrastrutture lo spostamento verticale relativo non deve superare il valore limite, assunto cautelativamente pari ad L/200 (5.0 ‰), essendo L la distanza tra due pilastri adiacenti (L=6000mm). Si fa presente che, all'epoca tale scelta fu fatta dagli scriventi sulla base della propria esperienza; tuttavia, i valori limite utilizzati sono coerenti con i valori di riferimento proposti dal Codice di Prevenzione Incendi [5] e riportati al comma 2 del paragrafo S.2.4.4.
In merito alla scelta delle strategie di prevenzione, per la protezione attiva e passiva nel caso in esame non sono stati previsti particolari accorgimenti; ci si è limitati alla determinazione delle vie di esodo secondo la norma di tipo prescrittivo (D.M. 16 febbraio 1986 [14]), che prevede anche il posizionamento degli estintori.
Si sottolinea che tale scelta è stata possibile in quanto la procedura di Deroga (ai sensi del DPR 37) è stata avviata solo con riferimento al requisito R90, cioè per verifica strutturale in caso d'incendio, garantendo il livello di sicurezza necessario per le altre verifiche mediante l'approccio prescrittivo attraverso il rispetto delle prescrizioni del D.M.Int. 01/02/1986. Allo stato attuale se il progettista sceglie di usare il Codice di Prevenzione Incendi [5] è tenuto a rispettarlo in ogni sua parte; pertanto ogni altra verifica, relativa all'esodo, agli impianti di protezione attiva o altro, dovrà essere conforme al D.M.Int. 03/08/2015 [5]

3.3 Determinazione del carico meccanico e del carico di incendio di progetto

Le Norme Tecniche per le Costruzioni [16] classificano l'incendio tra le azioni eccezionali; pertanto le azioni meccaniche da considerare per le verifiche di resistenza in caso d'incendio sono definite dalla *combinazione di carico per azioni eccezionali*:

$$A_d + G_1 + G_2 + \sum_{i=1}^{n} \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \qquad (1)$$

dove:
G_1 rappresenta il valore caratteristico dei pesi propri strutturali;
G_2 rappresenta il valore caratteristico dei carichi permanenti non strutturali;
$\psi_{2i} \cdot Q_{ki}$ corrisponde al valore quasi permanente dell'azione accidentale;
A_d rappresenta il valore di progetto dell'azione termica dovuta all'incendio.
Data la notevole variabilità della tipologia strutturale delle sovrastrutture delle autorimesse in esame, le analisi sono stata condotte, per semplicità e a vantaggio di sicurezza, con riferimento alla combinazione di carico eccezionale per la sovrastruttura più pesante (valore massimo del carico assiale complessivo su ciascuna colonna pari a 1800 kN).
Il carico d'incendio di progetto è strettamente legato alla tipologia di autoveicoli che possono essere presenti all'interno dell'autorimessa. Gli autoveicoli sono classificabili in base all'energia termica che possono rilasciare durante l'incendio. Una classificazione di tale tipo è riportata nel Report CEC Agreement 7215 - PP/025 [7], relativo alla ricerca condotta dal CITCM (Francia), PROFIL-ARBED Recherches (Lussemburgo) e TNO (Paesi Bassi) conclusa nel 2001. La classificazione riportata in Tabella 1 è tratta dall'attività di ricerca citata e riguarda alcuni modelli di auto in circolazione nel periodo 1995-1998. Le auto sono state classificate in cinque categorie in funzione del loro potere calorifico.

Tabella 1. Classificazione degli autoveicoli in funzione del potere calorifico.

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

La ricerca ha evidenziato che il potere calorifico degli autoveicoli è fortemente influenzato dalla capacità volumetrica del serbatoio dell'autovettura. In relazione alle automobili attualmente in commercio è possibile classificare come autoveicoli di categoria inferiore o uguale alla "Categoria 3" quelli aventi una cilindrata inferiore o uguale a 2000 cc, mentre quelli di cilindrata superiore appartengono alle "Categorie 4 e 5" (Tabella 1).
Dall'analisi delle statistiche automobilistiche ufficiali dell'A.C.I. relative alla "*Consistenza del Parco Autoveicoli secondo l'Alimentazione e la Cilindrata*" circolante in Abruzzo alla data 31/12/2008, risulta che la percentuale di autoveicoli di cilindrata superiore a 2000 cc circolante in Abruzzo è pari al 6.6% del totale del parco autoveicoli. Avendo ciascuna autorimessa una capienza massima di 34 autoveicoli, la percentuale di autoveicoli di cilindrata superiore a 2000 cc corrisponde a 2 autoveicoli su 34.
Pertanto, assumendo che la categoria di autoveicoli rappresentativa delle auto in circolazione sia la "Categoria 3", si può ipotizzare la presenza contemporanea nell'autorimessa di 32 autoveicoli di "Categoria 3", il cui potere calorifico massimo è pari a 9500 MJ, ed al più 2 auto di Categoria superiore o veicoli commerciali; a tal fine, si fa riferimento a veicoli commerciali (VAN) con potere calorifico di 9500 MJ contenenti 250 kg di materiale facilmente infiammabile (potere calorifico di 40 MJ/kg), per un totale di 19500 MJ (vedi [8]). Risulta in tal modo soddisfatto il criterio di far riferimento a valori con probabilità di superamento inferiore al 20% (ovvero frattile 80%), in coerenza con quanto previsto dal punto 2, comma 2, dell'Allegato al D.M. 9 marzo 2007 [2].
A questo punto, nota la più probabile distribuzione tipologica delle auto è possibile determinare il carico di incendio di progetto. Questo si ricava a partire dal carico d'incendio specifico che è definito dalla normativa [2] come il potenziale termico netto della totalità dei materiali combustibili presenti nel compartimento riferito alla superficie lorda dell'intero compartimento, corretto in base a parametri indicativi della partecipazione alla combustione dei singoli materiali. Nel caso in esame, essendo noto da test sperimentali ([7], [8]) il potere calorifico della singola auto, il carico di incendio può essere determinato nel modo seguente:

$$q_f = \frac{H_{tot}}{A_{tot}} = \frac{32 \cdot 9500\,\text{MJ} + 2 \cdot 19500\,\text{MJ}}{1276\,\text{m}^2} = 268.08\ \text{MJ}/\text{m}^2 \qquad (2)$$

da cui si ricava il valore del carico di incendio di progetto:

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \cdot q_f = 1.4 \cdot 1.0 \cdot 0.9 \cdot 268.08\ \text{MJ}/\text{m}^2 \cong 340\ \text{MJ}/\text{m}^2 \qquad (3)$$

dove:

- δ_{q1} è un fattore compreso tra 1 e 2, che tiene conto del rischio di incendio correlato alla dimensione in pianta del compartimento (tab. 1 dell'allegato al D.M. 09/03/07 [2]): per le autorimesse in esame è pari a 1.4;
- δ_{q2} è un fattore compreso tra 0.8 e 1.2, che tiene conto del pericolo di incendio correlato alle caratteristiche dell'attività svolta nel compartimento (tab. 2 dell'allegato al D.M. 09/03/07 [2]): nel caso in esame è pari a 1.0 (Classe di rischio II);

- δ_n è il fattore riduttivo del carico di incendio specifico, che tiene conto delle misure di protezione previste nell'attività (tab. 3 dell'allegato al D.M. 09/03/07 [2]): nel caso in esame è pari a 0.9 (si prevede solo l'accessibilità ai mezzi di soccorso).

3.4 Scelta degli scenari di incendio di progetto e Modellazione dell'incendio.

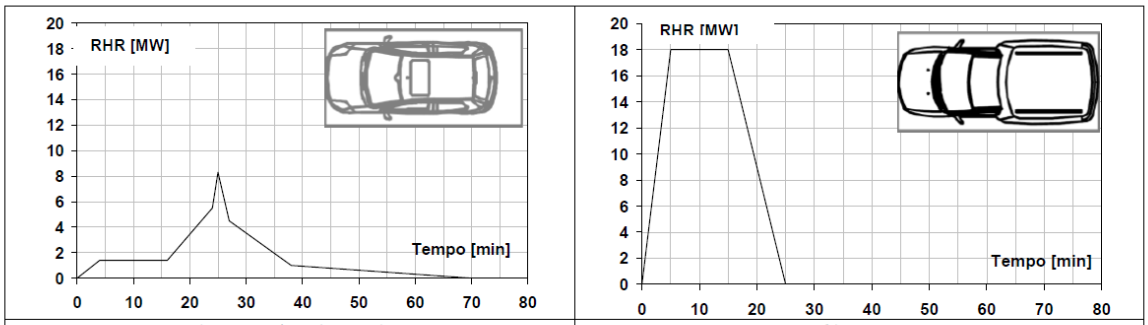
Lo scenario di incendio è sensibilmente influenzato, tra l'altro, dalla geometria dei locali che costituiscono il compartimento e dalle loro condizioni di ventilazione naturale. Per quanto concerne l'individuazione del numero di auto coinvolte nell'incendio ed i tempi di innesco dell'incendio da un'auto a quella adiacente, per il caso in esame si è fatto riferimento alle informazioni contenute nella ricerca europea [7], nella quale sono riportati i risultati di indagini statistiche su casi di incendi reali in parcheggi ed i risultati dei test in scala reale condotti a Vernon (Francia), sia in presenza di ventilazione libera che con ventilazione limitata. Tali risultati hanno consentito la redazione di Linee Guida INERIS [8]correntemente utilizzate in Francia dal 2006 per la definizione degli scenari di incendio di progetto in autorimesse aperte nell'applicazione dell'approccio ingegneristico della sicurezza in caso di incendio ai sensi del Decreto del Ministero dell'Interno Francese [17].
In sostanza, è necessario distinguere le *autorimesse aperte su tutti i lati* da quelle *parzialmente aperte* (aperture limitate o assenti su uno o più lati). La presenza di un'ampia ventilazione naturale nelle autorimesse aperte è tale da non permettere il raggiungimento delle condizioni di *flashover*, per cui il fenomeno rimane per tutta la durata dell'incendio di tipo "*pre-flashover*". In queste condizioni i possibili scenari di incendio sono costituiti dalla combustione di un numero limitato di autoveicoli che rimangono coinvolti nella propagazione del focolaio iniziale. Nelle autorimesse parzialmente aperte, invece, è possibile che la combustione interessi la totalità delle autovetture. Pertanto, l'individuazione degli scenari di incendio più pericolosi per la stabilità strutturale consiste nel definire la posizione ed il numero di autovetture che possono essere coinvolte nell'incendio e che determinano l'azione termica più pericolosa, tra quelle realisticamente ipotizzabili, per la struttura portante dell'edificio.
Applicando i criteri suggeriti nelle citate Linee Guida, per le *autorimesse aperte su tutti i lati* si sono scelte le tipologie di distribuzione delle auto descritte in Tabella 2 con tempo di propagazione dell'incendio da un'autovettura a quella adiacente pari a 12 min.

Tabella 2. Distribuzione autoveicoli coinvolti in incendi *pre-flashover* (Scenari di incendio localizzato)

Tipo 1 (L1)	7 autoveicoli, composti da un VAN centrale e 6 auto ai lati dello stesso, che bruciano con un tempo di propagazione di 12 min a partire dal VAN
Tipo 2 (L2)	4 autoveicoli, costituiti da un VAN e 3 auto, che circondano una colonna e bruciano con un tempo di propagazione di 12 min a partire dal VAN

Per definire gli scenari di incendio localizzato di progetto, le due tipologie di distribuzione delle auto potrebbero essere disposte all'interno dell'autorimessa in varie posizioni. Data la regolarità strutturale delle autorimesse, la posizione più gravosa dei veicoli è quella che determina una distribuzione dei flussi termici dissimmetrica, esaltando gli effetti iperstatici dovuti alle deformazioni termiche indotte dall'incendio. I due scenari di incendio di progetto di tipo localizzato (L1 ed L2) considerati nell'analisi sono riportati in Figura 4 con i relativi tempi di propagazione a partire dall'innesco del VAN.

Nel caso di un incendio localizzato (*pre-flashover*) le temperature nella fiamma, nei fumi e nel gas circostante non sono uniformi e si rende necessaria la loro determinazione in maniera separata, a differenza dell'incendio generalizzato (*post-flashover*), in cui la temperatura del gas nell'ambiente può essere ritenuta con buona approssimazione costante. L'Eurocodice 1 Parte 1-2 (Annesso C del EN1991-1-2 [11]) fornisce un metodo di valutazione, noto anche come "*Metodo di Hasemi*" per la determinazione delle azioni termiche per incendi localizzati, considerando come dati di input l'andamento della Velocità di Rilascio di Calore nel tempo (nota anche con l'acronimo RHR della dicitura anglosassone *Rate of Heat Release*) della combustione del singolo focolaio (singola auto).



a) Categoria 3 (AUTO) | b) VAN

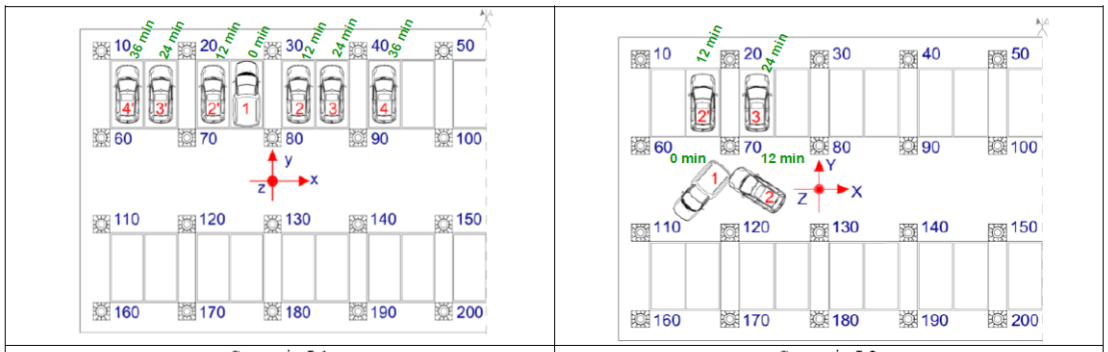
Figura 6. Curve sperimentali RHR.

Per la determinazione delle curve RHR relative alle due categorie di autoveicoli (Categoria 3 e VAN) presenti nelle autorimesse in esame si fa riferimento nuovamente alla ricerca europea [7]; nel report, infatti, sono contenuti anche i risultati dei test condotti al cono calorimetrico su un campione ampio di autoveicoli. A parità di categoria di autovettura nella ricerca sono stati effettuati gli inviluppi delle curve RHR sperimentali ottenendo curve RHR caratteristiche per ogni categoria; in Figura 6 sono riportate la curva di rilascio termico dell'autovettura di categoria 3 (Figura 6a) e quella del VAN (Figura 6b).

Per gli scenari di incendio di tipo generalizzato si applica il "*Modello ad una zona*", suggerito nell'Appendice D del citato Eurocodice 1 Parte 1-2, determinando l'andamento nel tempo della temperatura nell'ambiente; a tal fine si utilizza il software di calcolo OZone ver. 2.2 [19], che consente di determinare la curva tempo-temperatura dei gas nell'ambiente, nell'ipotesi di temperatura nel compartimento uniforme, in funzione delle caratteristiche geometriche del compartimento, delle caratteristiche termiche dei materiali di cui è costituito, delle condizioni di ventilazione e del tasso di crescita del fuoco, ottenuto attraverso la sovrapposizione temporale delle curve di rilascio termico delle singole autovetture secondo la sequenza di innesco.

Il risultato delle due modellazioni è differente: infatti, mentre il metodo di Hasemi restituisce l'andamento del flusso di calore che lambisce il soffitto in funzione sia del tempo che della distanza dall'asse del focolaio, il modello ad una zona restituisce direttamente l'andamento della temperatura all'interno del compartimento in funzione del tempo.

L'applicazione del metodo di Hasemi agli scenari localizzati di progetto (Figura 4) ha fornito gli andamenti nel tempo dei flussi termici impattanti le colonne di acciaio, di cui alcuni esempi sono riportati in Figura 7.



Scenario L1 | Scenario L2

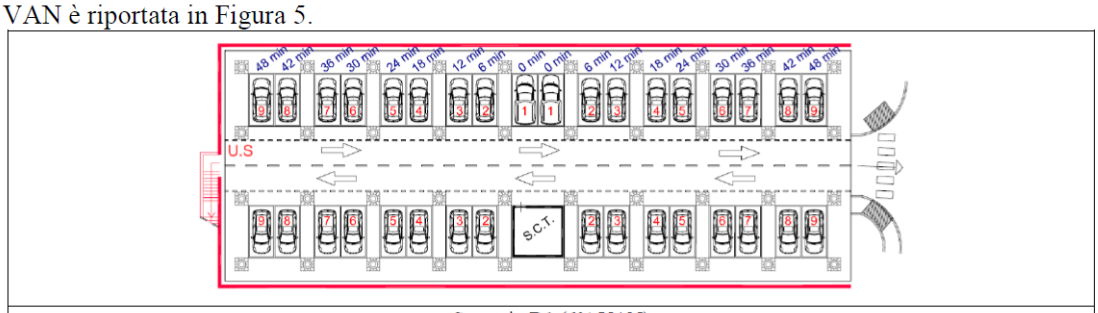
Figura 4. Scenari di incendio pre-flashover.

Invece, per quanto riguarda i casi di *autorimesse parzialmente aperte* (aperture limitate o assenti su uno o più lati), oltre a considerare gli scenari di incendio localizzato (*pre-flashover*), si devono considerare anche scenari di incendio generalizzati (*post-flashover*), che coinvolgono, nell'ipotesi estrema che sia impegnata la totalità dei posti auto disponibili, tutti gli autoveicoli presenti. Il tempo di propagazione scelto per questo caso a partire dall'innesco dell'incendio è di 6 min, in accordo con i risultati dei citati test sperimentali in scala reale su autorimesse con ventilazione limitata. Da queste considerazioni e dall'analisi della consistenza del Parco autoveicoli si determina lo scenario di progetto di tipo generalizzato, considerando come distribuzione più probabile delle autovetture (Tabella 3) la presenza di una quantità di VAN pari al 6% del numero totale di autoveicoli.
È necessario evidenziare che, per le autorimesse parzialmente aperte qui considerate, in cui è possibile lo sviluppo di incendi generalizzati, il Codice di Prevenzione Incendi [5] non fornisce alcuna indicazione sugli scenari di incendio di progetto (gli scenari definiti dal Codice, conformi a quelli riportati in Figura 4, sono applicabili ad autorimesse aerate, in altre parole al "*autorimesse aventi entrambe le seguenti caratteristiche: a) autorimessa aperta le cui aperture di smaltimento costituiscano almeno il 50% della superficie complessiva della facciata su cui sono attestate; b) autorimessa fuori terra ed a spazio aperto*"). Ciò detto sulla base delle caratteristiche geometriche e architettoniche di dette autorimesse e dell'esperienza degli autori, per le autorimesse parzialmente chiuse si è aggiunto agli scenari di Figura 4 anche lo scenario generalizzato di Figura 5.

Tabella 3. Distribuzione autoveicoli coinvolti in incendi post-flashover.

Scenario D1 (6% VAN)	34 autoveicoli, composti da 2 VAN in posizione centrale e 32 auto nei rimanenti stalli, che bruciano con un tempo di propagazione di 6 min a partire dai 2 VAN in successione di gruppi composti da 4 auto per volta

La disposizione degli autoveicoli ed i relativi tempi di propagazione a partire dall'innesco dei 2 VAN è riportata in Figura 5.



Scenario D1 (6% VAN)

Figura 5. Scenari di incendio post-flashover.

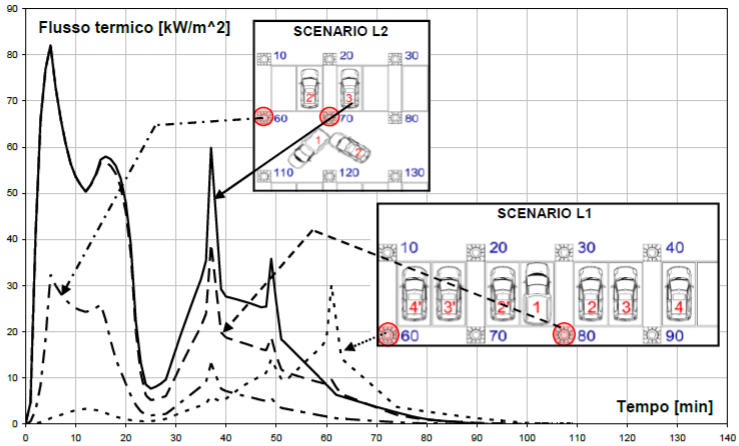


Figura 7. Flusso termico negli scenari pre-flashover.

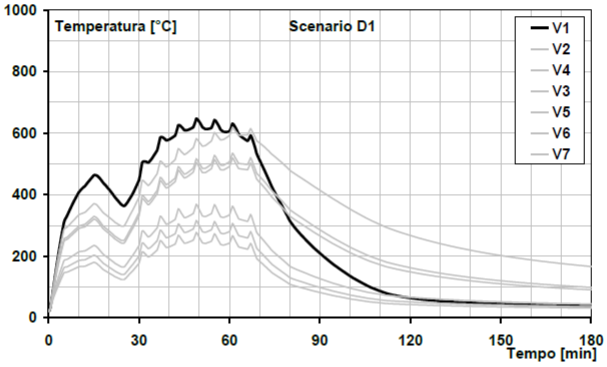


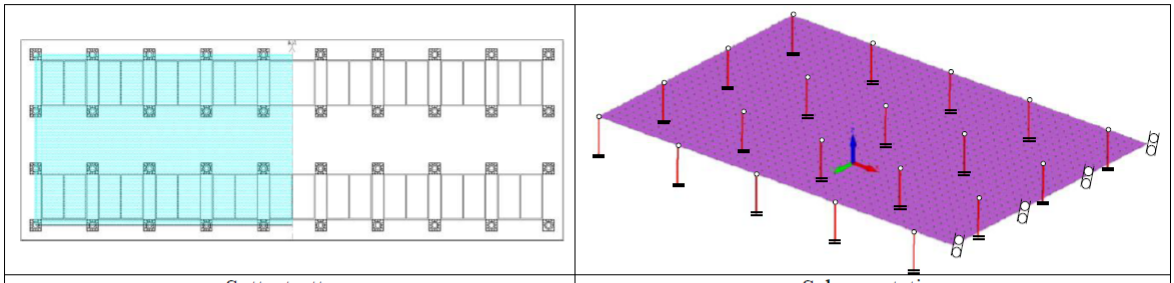
Figura 8. Andamento della curva di incendio nell'incendio post-flashover.

In Figura 8 sono riportati i diversi andamenti della curva tempo-temperatura nel compartimento, ottenuti dall'applicazione del modello ad una zona allo scenario di incendio generalizzato (Figura 5). La possibilità di varie condizioni di ventilazione, per le autorimesse in esame, ha reso necessaria la loro simulazione adottando 7 differenti classi di ventilazioni (V1,…, V7). Al fine di valutare la sicurezza delle strutture durante l'incendio nelle analisi strutturali si farà riferimento solo alla condizione di ventilazione V1, in quanto la temperatura degli elementi strutturali è fortemente dipendente dalla temperatura massima raggiunta e dalla fase di crescita dell'incendio ed è proprio in tale fase che l'incendio con condizioni di ventilazione V1 risulta il più gravoso.
I flussi termici ottenuti applicando il metodo di Hasemi e la curva tempo-temperatura per la condizione di ventilazione V1 costituiscono l'input per l'analisi del comportamento termo-meccanico della struttura rispettivamente per gli scenari di incendio di progetto localizzati e generalizzato.

3.5 Modello strutturale e verifica di sicurezza in condizione di incendio

Nello svolgimento dell'**analisi termo-meccanica globale**, al fine di limitare l'onere computazionale senza compromettere l'accuratezza dei risultati [20], si fa riferimento alla sottostruttura evidenziata in Figura 9. L'estensione della sottostruttura consente di valutare in modo appropriato sia i campi termici che gli effetti iperstatici indotti dalle differenti dilatazioni termiche delle colonne e dalle curvature termiche della soletta in c.a.. Lungo il bordo sezionato viene introdotta la condizione vincolare di doppio pendolo, impedendo gli spostamenti orizzontali in direzione longitudinale e le rotazioni intorno all'asse trasversale. Tale condizione vincolare, grazie alla simmetria strutturale, risulta pienamente congruente per le analisi in condizioni normali di

temperatura e per lo scenario di incendio di tipo generalizzato (Scenario D1), mentre è a vantaggio di sicurezza per gli altri scenari (scenari di tipo localizzato), massimizzando in virtù dell'infinita rigidezza rotazionale gli effetti iperstatici indotti sulle colonne dalla curvatura termica della soletta. Le colonne di acciaio sono incastrate alla base e collegate alla piastra della sovrastruttura con un vincolo interno che consente le rotazioni (cerniera).



Sottostruttura	Schema statico

Figura 9. Modello analisi termo-meccanica globale.

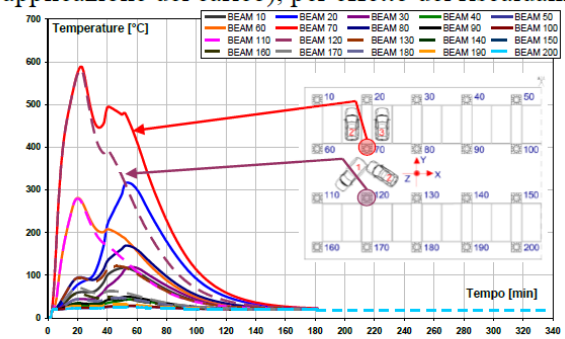
Figura 10. Modello per l'analisi termo-meccanica di dettaglio.

Le analisi sia termiche che meccaniche della sottostruttura di Figura 9 sono condotte con l'ausilio del programma di calcolo agli elementi finiti SAFIR2007a [21], che consente analisi non lineari meccaniche ed in grandi spostamenti. Le colonne di acciaio sono modellate con elementi monodimensionali (BEAM) di sezione circolare cava, mentre la piastra in calcestruzzo armato è modellata con elementi bidimensionali (SHELL).
Oltre all'analisi globale, si effettua anche un'**analisi termo-meccanica di dettaglio**, al fine di calcolare in modo più accurato i campi termici e la distribuzione di tensioni nei capitelli e di valutare l'eventuale presenza di fenomeni di instabilità locale nel fusto della colonna, caratterizzata da valori di snellezza locale D/t elevati. In tal caso, si costruisce un modello tridimensionale (Figura 10) della colonna comprensiva di capitello sommitale, utilizzando elementi finiti 3D (solidi), per la quale si considerano agenti i medesimi flussi termici o campi di temperatura definiti per l'analisi globale. La modellazione viene sviluppata, in campo non lineare geometrico e meccanico, con il codice di calcolo ABAQUS/standard [22].

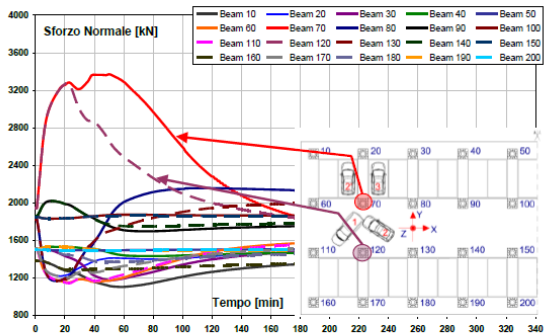
3.6 Risultati

Per motivi di brevità si riportano i risultati della risposta strutturale in caso di incendio con riferimento al solo scenario di incendio L2, che risulta essere quello più sfavorevole (Figura 11).
Dalla Figura 11-a si evince anzitutto che le temperature massime raggiunte nelle colonne non superano i 600°C. Risulta evidente che le colonne maggiormente riscaldate, ovvero quelle più vicine al VAN (caratterizzato da un potere calorifico totale maggiore, cfr. paragrafo 3.4), raggiungono una temperatura massima di circa 580°C in corrispondenza di un tempo di esposizione all'incendio di circa 20 minuti.

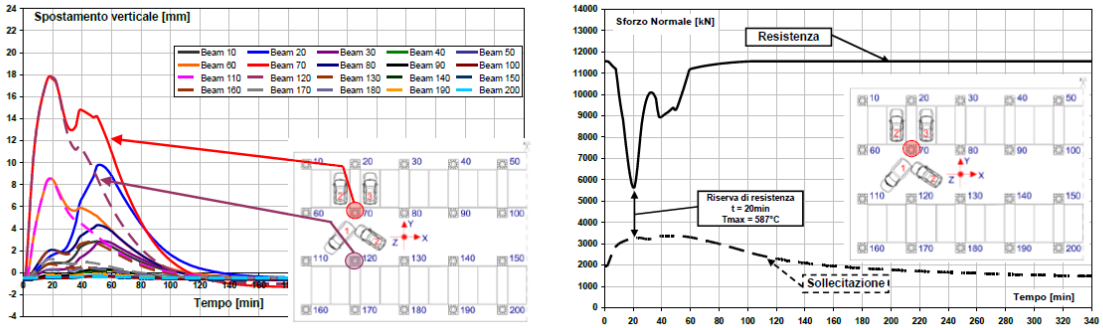
L'azione termica causa nelle colonne e nella soletta delle dilatazioni termiche. La curvatura di origine termica della soletta in c.a. induce nelle colonne della zona maggiormente esposta all'incendio, un incremento significativo di sforzo assiale (Figura 11-b). Tale incremento è ulteriormente amplificato dall'allungamento termico differenziale (Figura 11-c) delle colonne, esposte a diverse condizioni termiche, che viene contrastato dalla rigidezza tagliante della soletta.
La dilatazione termica indotta dall'incendio, difatti, determina un allungamento delle colonne con conseguenti spostamenti verso l'alto (Figura 11-c). Gli spostamenti riflettono, in generale, l'andamento delle temperature. Tuttavia, la riduzione di rigidezza che gli elementi strutturali patiscono alle alte temperature può portare ad una prematura inversione dell'andamento degli spostamenti. Infatti, per la colonna 70 dello scenario L2, gli spostamenti crescono fino al tempo di circa 18 minuti (corrispondenti al raggiungimento di una temperatura di circa 570°C), invertendo successivamente il loro andamento a causa della presenza di un elevato carico assiale e della riduzione del modulo elastico con la temperatura. L'accorciamento è successivamente determinato anche dalla riduzione della temperatura, che inizia dopo circa 20 minuti di esposizione all'incendio. In seguito al quasi completo raffreddamento della colonna è possibile notare una piccola deformazione residua, essendo lo spostamento finale lievemente diverso dallo spostamento elastico iniziale (presente prima dell'inizio dell'incendio).
Inoltre, si può notare che lo spostamento differenziale massimo raggiunto tra le colonne adiacenti risulta di modesta entità. Difatti si rileva che lo spostamento differenziale, durante l'incendio, tra la colonna 80 e la colonna 130 assume il valore massimo di circa 16mm al tempo di esposizione di circa 20 minuti. Tale valore corrisponde al 2.6 ‰ (16mm/6000mm), decisamente inferiore al valore limite del 5.0‰ assunto come limite del livello prestazionale adottato (vedi par. 3.2).
Le verifiche di resistenza automaticamente eseguite dal codice di calcolo utilizzato vengono anche integrate da un controllo "esterno", confrontando lo sforzo normale agente durante l'incendio con lo sforzo normale resistente delle colonne, calcolato in accordo alle NTC2008 [16] ed all'EN 1993-1-2 [23] e considerando l'instabilità degli elementi. Tale verifica evidenzia che la colonna più sollecitata, anche in corrispondenza della temperatura massima, ha ancora una significativa riserva di resistenza (Figura 11-d).
Per quanto riguarda le analisi di dettaglio della colonna, queste mostrano (Figura 12) anzitutto che la dilatazione termica indotta dall'incendio determina un allungamento della colonna con conseguenti spostamenti verso l'alto. Questi ultimi crescono fino al tempo di circa 15 minuti (corrispondenti al raggiungimento nel tubo di una temperatura di circa 580°C), invertendo successivamente il loro andamento a causa della riduzione del modulo elastico con la temperatura e per la presenza del carico applicato. L'accorciamento è successivamente determinato anche dalla riduzione della temperatura che nel tubo inizia dopo circa 20 minuti di esposizione all'incendio. In seguito al quasi completo raffreddamento della colonna è possibile notare una deformazione finale differente da quella elastica iniziale (precedente all'inizio dell'incendio). La deformazione residua è pari a circa 5mm per la zona centrale del capitello e a circa 2mm per la parte sommitale del tubo: ciò è indice di contenute plasticizzazioni nella colonna e nel capitello (soprattutto nella zona di applicazione del carico), per effetto del riscaldamento della struttura.



a) Andamento nel tempo della temperatura nelle colonne

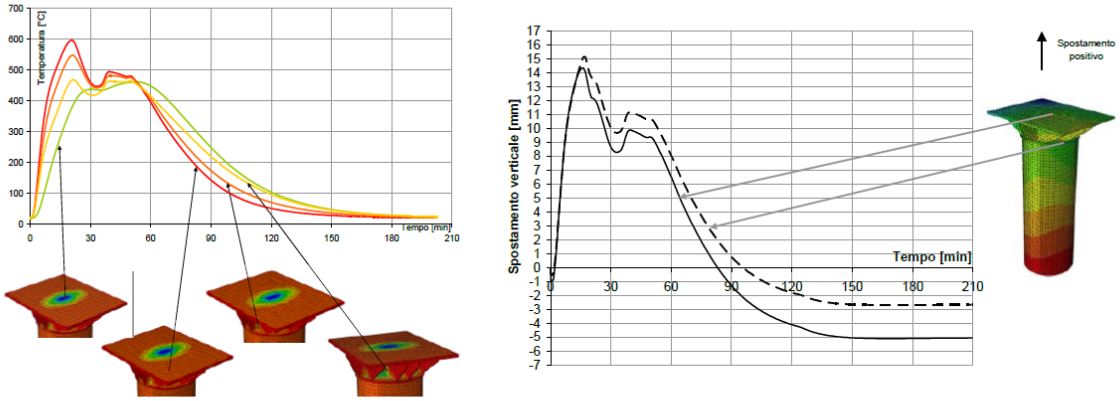


b) Andamento nel tempo dello sforzo normale nelle colonne



c) Andamento nel tempo dello spostamento in testa delle colonne d) Verifica all'instabilità della colonne ai sensi del NTC2008

Figura 11. Risultati Scenario L2 – Analisi Globale.



a) Andamento nel tempo della temperatura nelle colonne b) Andamento nel tempo dello spostamento

Figura 12. Risultati Scenario L2 – Analisi di dettaglio.

Analoghe considerazioni sono valide anche per gli altri scenari di incendio, per cui si può concludere che la struttura ed in particolare le colonne esibiscono una resistenza sufficiente durante l'intero sviluppo dell'incendio di progetto, compresa la fase di raffreddamento. Difatti, la struttura, in assenza di qualunque sistema di protezione al fuoco, riesce a superare gli incendi di progetto senza raggiungere condizioni di collasso, presentando deformazioni residue molto contenute legate alla presenza di zone plasticizzate.

3.7 Verifica di Resistenza per Incendio Standard ISO 834 (D.M.Int. 09/03/2007)

Ai sensi del punto 4.2, comma 3, dell'allegato al D.M. Min. Interno del 9 marzo 2007, qualora il progettista applichi l'approccio prestazionale della sicurezza strutturale in caso di incendio, deve essere comunque eseguita la verifica della capacità portante degli elementi costruttivi rispetto all'azione termica della curva di incendio nominale standard (ISO 834), con riferimento alle classi minime dedotte in funzione del carico d'incendio specifico di progetto ($q_{f,d}$) (cfr. tabella 5 del D.M.Int. 09/03/2007 [2]). Nel caso in esame, per il carico di incendio di progetto definito nel Paragrafo 3.3 si ricava che il requisito minimo richiesto è R15.

Si fa presente che quest'ulteriore verifica non è più prevista nel caso in cui venga applicato il Codice di Prevenzione Incendi (D.M.Int. 03/08/2015 [5]). In sostanza il professionista non è tenuto ad eseguirla solo se sceglie di seguire le indicazioni di detto Codice ([5], [6]) in ogni sua parte; se, invece, sceglie di andare in deroga al D.M.Int. 01/02/1986, applicando l'approccio ingegneristico secondo il D.M.Int. 09/05/2007, deve eseguire anche questa verifica.

Al fine di effettuare la verifica della classe minima, si procede con il metodo per singoli elementi (cfr. EN1993-1-2), verificando che la colonna soggetta ai carichi della combinazione di carico quasi permanente sia in grado di resistere ad un incendio di tipo standard per la durata di 15 min.

La valutazione della resistenza della colonna in presenza dell'incendio nominale viene effettuata utilizzando le formulazioni proposte dall'EN1993-1-2 [23]. Il campo termico viene determinato sottoponendo la superficie laterale della colonna ad una variazione della temperatura esterna corrispondente alla curva di incendio standard. In testa alla colonna viene applicato un carico verticale costante nel tempo e pari a 1800kN, valore massimo del carico assiale sulle colonne per la combinazione di carico eccezionale.
La resistenza della colonna per effetto dell'incendio standard raggiunge il valore della sollecitazione agente in corrispondenza di un tempo di esposizione di circa 35 minuti (Figura 13), garantendo quindi una **classe di resistenza R30**. La verifica ai sensi del punto 4.2, comma 3, dell'allegato al D.M. Min. Interno del 9 marzo 2007 è pertanto ampiamente soddisfatta.

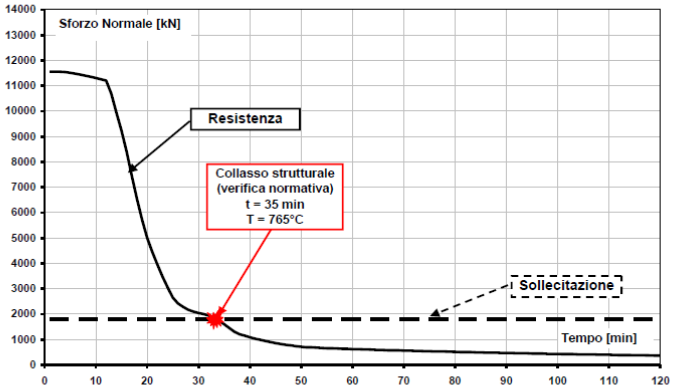


Figura 13. Verifica della colonna di acciaio nel caso di incendio standard ISO834

4 CONCLUSIONI

L'approccio ingegneristico per la sicurezza strutturale in condizioni d'incendio (FSE) è ormai possibile grazie alle recenti disposizioni normative nazionali ([3], [16], [5]) che trovano il naturale completamento operativo nelle parti fuoco degli Eurocodici strutturali ([18],[23]).
Tale approccio consente di analizzare, grazie a modelli di calcolo avanzati applicati sia all'incendio che all'analisi termo-meccanica della struttura, il reale comportamento della struttura esposta a scenari di incendio "naturale". L'applicazione dell'approccio ingegneristico alle autorimesse, a cui il presente lavoro è dedicato, è consentito proprio dalla possibilità di definire scenari di incendio adeguati, selezionati mediante criteri di tipo deterministico, grazie anche ai risultati di importanti lavori di ricerca teorica e sperimentale condotti in ambito europeo e nazionale. I risultati di tali attività sono confluiti nel Codice di Prevenzione Incendi [5], tramute il D.M.Int. 21/02/2017 [6], per quanto riguarda le "autorimesse aperte" (*autorimesse aventi entrambe le seguenti caratteristiche: a) autorimessa aperta le cui aperture di smaltimento costituiscano almeno il 50% della superficie complessiva della facciata su cui sono attestate; b) autorimessa fuori terra ed a spazio aperto)*. Per quanto concerne le autorimesse parzialmente aperte o chiuse, la definizione degli scenari d'incendio di progetto è responsabilità del progettista e va eseguita basandosi sulla propria esperienza e sulle caratteristiche dell'autorimessa oggetto di intervento, avvalendosi comunque delle metodologie e dei criteri suggeriti nella letteratura tecnica ed esplicitati anche nella sezione M del Codice di Prevenzione Incendi [5].
Un incendio naturale è costituito sia da una fase di crescita delle temperature dell'ambiente e, conseguentemente, degli elementi strutturali, sia da una fase decrescente che produce un gradiente termico negli elementi strutturali di segno opposto a quello prodotto dalla fase di riscaldamento. Spesso a seguito del riscaldamento la struttura è sollecitata oltre il campo del comportamento elastico-lineare, determinandosi plasticizzazioni in alcuni punti e deformazioni permanenti (come accade anche nel caso studio presentato); la fase raffreddamento avviene su una struttura già

plasticizzata, il che può condurre, al termine del raffreddamento, ad una distribuzione delle sollecitazioni diversa da quella presente nella stessa struttura nelle normali condizioni ambientali. Le sollecitazioni aggiuntive indotte dal gradiente termico potrebbero provocare comunque il collasso strutturale.
I modelli di calcolo termo-meccanico avanzato, basati su analisi non lineari nei grandi spostamenti, consentono di valutare le sollecitazioni aggiuntive indotte dal gradiente termico ed eventuali deformazioni residue, che mediante l'approccio prescrittivo non è possibile controllare pienamente, in quanto tale approccio si basa sull'adozione di una curva di incendio standard sempre crescente e quindi non realistica (sebbene generalmente cautelativa) e consente d'altro canto l'utilizzo di modelli di calcolo semplificati, quali ad esempio l'analisi strutturale di singoli elementi.
Sulla base delle analisi termo-meccaniche e delle verifiche di sicurezza in condizioni di incendio condotte per le autorimesse del caso studio, costituite dalle autorimesse collocate al piano terra degli edifici realizzati nell'ambito del Progetto C.A.S.E. per L'Aquila, si evince che le strutture portanti delle stesse, ed in particolare le colonne di acciaio considerate senza protezioni soddisfano il livello di prestazione fissato con riferimento agli scenari di incendio considerati, grazie anche ad una certa sovraresistenza a freddo, dovuta all'assenza delle azioni sismiche e di quelle del sollevamento per la sostituzione degli isolatori nella combinazione di carico eccezionale da considerare in caso di incendio. Si sottolinea che, la procedura descritta nel presente lavoro, sebbene svolta nell'anno 2009, risulta conforme al Codice di Prevenzione Incendi [5] ovvero al D.M.Int. 21/02/2017 [6].

5 REFERENCES

[1] Decreto del Ministero dell'Interno del 16 febbraio 2007, Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione, GU n. 74 del 29 marzo 2007
[2] Decreto del Ministero dell'Interno del 9 marzo 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.
[3] Decreto del Ministero dell'Interno del 9 maggio 2007, Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio, GU n. 117 del 22 maggio 2007.
[4] Decreto del Presidente della Repubblica n°151 del 01 agosto 2011, Nuovo Regolamento di Semplificazione di Prevenzione Incendi, G.U. n. 221 del 22 settembre 2011.
[5] Decreto del Ministero dell'Interno del 03 agosto 2015, Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139, GU n. 192 del 20/8/2015 - S.O. n. 51.
[6] Decreto del Ministero dell'Interno del 21 febbraio 2017, Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi per le attivita' di autorimessa, GU n.52 del 3-3-2017.
[7] CEC Agreement 7215 - PP/025 (2001), "Demonstration of Real Fire Tests in Car Parks and High Buildings".
[8] INERIS, "Parcs de stationnement en superstructure largement ventiles. Avis d'expert sur les scénarios d'incendie", Ottobre 2001.
[9] Nigro E., Cirillo V., Pustorino S., Princi P., Ferraro A., "Approccio ingegneristico per la sicurezza strutturale in condizioni di incendio: il caso delle autorimesse fuori terra", *Handling Exceptions in Structural Engineering: Robustezza strutturale, scenari accidentali, complessità di progetto*, Università degli Studi di Roma "Sapienza", Roma, Novembre 2008.
[10] Pustorino S., Nigro E., Cirillo W., Giomi G., Attività n.5: Determinazione degli scenari di incendio di progetto per l'applicazione dell'approccio ingegneristico alla progettazione strutturale dei parcheggi aerati. Attività svolta dalla Commissione per la sicurezza in caso di Incendio per le Strutture di Acciaio della Fondazione Promozione Acciaio (http://www.promozioneacciaio.it/UserFiles/File/pdf/pubblicazioni/05_autorimesse.pdf).

[11] V. Cirillo, E. Nigro, S. Pustorino (2010). Approccio ingegneristico per la sicurezza strutturale: il caso delle autorimesse aerate – Parte I, *Antincendio*, n. 5, Maggio 2010, pp. 70-87, ISSN: 0393-7089.

[12] V. Cirillo, E. Nigro, S. Pustorino (2010). Approccio ingegneristico per la sicurezza strutturale: il caso delle autorimesse aerate – Parte II, *Antincendio*, n. 6, Giugno 2010, pp. 62-78, ISSN: 0393-7089.

[13] Decreto del Ministero dell'Interno del 16 febbraio 1982: "Modificazioni del decreto ministeriale 27 settembre 1965, concernente la determinazione delle attività soggette alle visite di prevenzione incendi", G.U. n. 98 del 9 aprile 1982.

[14] Decreto del Ministero dell'Interno del 1 Febbraio 1986: "Norme di sicurezza antincendio per la costruzione e l'esercizio di autorimesse e simili", G.U. n. 38 del 15 Febbraio 1986.

[15] Nigro E., Ferraro A., Cefarelli G., "L'uso della FSE nella progettazione strutturale finalizzata alla sicurezza antincendio", *Antincendio*, n. 8, Agosto 2009.

[16] Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. II.TT. 14/01/2008, S.O. n. 29 G.U. del 4 febbraio 2008.

[17] Arrête, "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.

[18] EN 1991-1-2 (2002), "Eurocode 1. Actions on structures - Part 1-2: General actions - actions on structures exposed to fire, November.

[19] Cadorin J-F., Franssen J-M., "A tool to design steel elements submitted to compartment fires-Ozone V2. Part 1: pre and post flashover compartment fire model", Fire Safety Journal, Vol 38 No. 5, pp395-427, 2003.

[20] Nigro E., Pustorino S., Cefarelli G., Princi P., "Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio", Ed. Hoepli, Milano, 2009.

[21] Franssen J.M., - "User Manual for SAFIR2007: A Computer Program for Analysis of Structures Submitted to the Fire", University of Liege, Belgium, Gennaio 2008.

[22] ABAQUS Standard/explicit Theory Manual, Hibbit Karlsson and Soresen, Version 6.7, USA 2008.

[23] EN 1993-1-2, "Eurocode 3. Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design", April 2005.

[24] EN 1992-1-2, "Eurocode 2. Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design", April 2005.

I contenuti del presente articolo sono stati pubblicati sulla rivista ANTINCENDIO n°8 del 2017 e n°1 del 2018, EPC Editore, ISSN: 0393-7089.