



LA SFIDA EUROPEA
DELLA **FSE**

VOLUME
PRIMO
2021

LA SFIDA
EUROPEA
DELLA
FSE

VOLUME PRIMO
2021



La disciplina della Fire Safety Engineering (FSE) rappresenta lo strumento di transizione dall'approccio classico di tipo prescrittivo alla sicurezza antincendio ad un approccio di tipo prestazionale, la cui applicazione richiede una profonda conoscenza della Fire Science e dei fenomeni fisici che descrivono la dinamica degli incendi. Le potenzialità di tale disciplina sono ampiamente riconosciute a livello internazionale, e anche l'Italia, paese tradizionalmente a vocazione legislativa, si sta muovendo gradualmente sulla scia del resto d'Europa.

Lo dimostrano i giovani professionisti italiani che decidono di dedicare la propria carriera allo studio e applicazione della FSE, proiettandosi in un contesto internazionale di innovazione, competenze di alto livello e condivisione della conoscenza.

La Fondazione "Egheomai" si fa promotrice, attraverso la pubblicazione di questo volume, degli obiettivi dell'iniziativa "La sfida Europea della Fire Safety Engineering", con il supporto di esponenti del mondo accademico, del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, da professionisti del settore e dalla rivista nazionale "Antincendio". L'intento è quello di creare uno scambio biunivoco: portare i progressi della FSE dall'Europa in Italia e diffondere al di fuori dei confini nazionali il lavoro degli italiani che operano nel settore. Lo scopo dell'iniziativa è infatti in linea con la missione della fondazione: la ricerca, lo sviluppo e l'innovazione nel campo della scienza, dell'ingegneria, della storia della sicurezza individuale e collettiva.

Ho fortemente sostenuto l'iniziativa sin dalla sua ideazione, motivato anche dall'interesse e conoscenza delle tematiche trattate, a cui ho dedicato la mia vita professionale.

The Fire Safety Engineering (FSE) discipline represents the transition from the fire safety classic prescriptive approach to a performance-based one. The application of the latter requires a deep knowledge of Fire Science and of the physical phenomena that describe the fire dynamics. The potential of this discipline is widely recognized at international level, and even Italy, a country traditionally characterized by a legislative vocation, is gradually following the rest of Europe.

This is demonstrated by the young Italian professionals who decide to devote their careers to the study and application of FSE, projecting themselves into an international context of innovation, high-level skills, and knowledge sharing.

The "Egheomai" Foundation is promoting, through the publication of this volume, the objectives of the initiative "The European Challenge of Fire Safety Engineering", with the support of representatives from the Academia, the National Fire Brigade Corps, professionals from the sector and the national magazine "Antincendio". The aim is to create a two-way exchange: to bring the progress of FSE from Europe to Italy and to disseminate the work of Italians operating in the field beyond national borders. The scope of the initiative is in fact in line with the foundation's mission: research, development and innovation in the field of science, engineering and the history of individual and collective safety.

I strongly supported the initiative since its conception, also motivated by my interest and knowledge of the involved topics, to which I devoted my professional life.

Il Presidente della Fondazione Egheomai
The President of the Egheomai Foundation
Giuseppe G. Amaro



La sfida europea della Fire Safety Engineering e il “Caso Italia”
The European challenge of Fire Safety Engineering in Italy

- 1 L'analisi del rischio volta alla protezione del patrimonio culturale – caso studio
Risk analysis aimed at the protection of cultural heritage - case study
- 2 Ingegneria della sicurezza antincendio: la scelta del modello di calcolo
Fire safety engineering: choosing the calculation model
- 3 Incendi nell'interfaccia urbano-foresta: il progetto WUIVIEW
Fires at the Wildland-Urban Interface: the WUIVIEW project
- 4 Valutazione degli effetti termici in caso di incendio di un'imbarcazione di grandi dimensioni in banchina.
Evaluation of the thermal effects in case of a big fire of a moored yacht
- 5 Le numerose sfide antincendio per la progettazione di data centre
The Numerous Fire Safety Challenges of Data Centre Design
- 6 Rischio incendio delle batterie al litio e prospettive e contributi dal mondo della ricerca
Fire risk for lithium-ion batteries and contributions and perspectives from the research community

La sfida europea della Fire Safety Engineering e il “Caso Italia”
The European challenge of Fire Safety Engineering in Italy

La sfida europea della Fire Safety Engineering e il “Caso Italia”

A cura di Flaminia Ciccotti

Abstract

La rivista Antincendio, da Luglio 2021, dedica un focus riservato all'approfondimento della Fire Safety Engineering. Si tratta di un progetto, ideato con la Fondazione Egheomai ed il sostegno della sezione italiana della SFPE, che coinvolgerà giovani professionisti italiani che hanno intrapreso un percorso di studi universitari ed extrauniversitari partecipando al master internazionale “International Master of Science in Fire Safety Engineering”, organizzato congiuntamente dalla Ghent University, Lund University, The University of Edinburgh.

Le competenze raggiunte saranno messe in risalto attraverso la pubblicazione di una serie di articoli inediti, il cui rigore sarà garantito da un prestigioso Comitato Tecnico Scientifico.

L'introduzione della Fire Safety Engineering in Italia, a partire dalla fine degli anni 90, ha rappresentato un passaggio fondamentale per l'evoluzione dell'approccio alla sicurezza antincendio nel nostro Paese ed è avvenuta sostanzialmente in linea con quanto accadeva nel resto dei paesi avanzati in questo campo.

In quanto Paese a forte vocazione “legislativa/regolamentaria”, i professionisti coinvolti, hanno vissuto questo passaggio più come un ulteriore cambio di normativa, con maggiori possibilità di soluzione di problemi complessi, che come un passaggio culturale epocale dal quale non si sarebbe più tornati indietro. La conseguenza principale di questo fraintendimento è stata la mancata percezione che l'introduzione della FSE non richiedeva semplicemente la conoscenza e l'inserimento del nuovo strumento nei procedimenti di prevenzione incendi, bensì necessitava di un cambio culturale e dell'avviamento di una vera disciplina della “ingegneria della Sicurezza Antincendio” che invece il mondo accademico nazionale, in questo sostanzialmente unico nel panorama internazionale ed europeo in particolare, non ebbe modo di percepire.

L'isolamento nel panorama europeo

Tuttora si registrano sparuti esempi di singoli insegnamenti, o parte di essi, inseriti qui o là in corsi di Laurea in Ingegneria o in Architettura, mentre di una facoltà di Ingegneria della Sicurezza

Antincendio non si parla ancora in nessun ateneo nazionale.

In questo si deve riconoscere appunto di essere sostanzialmente isolati nel panorama Europeo, nel quale spiccano alcune facoltà di vera e propria Ingegneria Antincendio istaurate nell'alveo della tradizione della Fire Engineering che ha trovato il suo primo sviluppo negli anni '80 fra il Maryland e Washington negli Stati Uniti e soprattutto nell'ambito di prestigiosi Istituti di Ricerca e studio come il NIST (National Institute of Standard and Technology). In quegli anni muoveva i suoi primi passi, come associazione indipendente dall'NFPA, nel cui alveo era nata parecchi anni prima, la SFPE, Society of Fire Protection Engineers che oggi festeggia appunto i suoi primi 50 anni di attività e che, con l'introduzione dell'Handbook of Fire Protection Engineering, giunto oggi alla 6° edizione, ha segnato un passaggio essenziale nell'affermazione della Fire Engineering, che da allora si è avviata verso l'affermazione come vera e propria scienza ingegneristica quantitativa, abbandonando progressivamente il proprio ruolo di “disciplina prescrittiva” in cui la scarsa conoscenza dei fenomeni l'aveva relegata per lunghissimo tempo.

Le Core Competencies per operare nell'Ingegneria Antincendio

Una delle ultime campagne lanciate dalla SFPE a livello internazionale è la campagna per l'affermazione delle Core Competencies, le competenze essenziali che si devono possedere per operare nella ingegneria antincendio; in un documento di 8 pagine facilmente scaricabile dal sito della SFPE (www.sfpe.org) si riassumono la gran parte delle conoscenze essenziali che si devono possedere per poter operare validamente come “fire engineer”.

E si tratta essenzialmente di conoscenze di chimica, di fisica, di chimica – fisica, di termodinamica, di fluidodinamica, ma anche di scienze comportamentali, dinamica di movimento delle masse, tecnologie di controllo e soppressione dell'incendio, etc. che caratterizzano la cultura del “fire engineer” come viene considerato nella gran parte del mondo.



Per far conoscere meglio questo mondo e stimolare in qualche modo l'interazione fra l'Italia e gli altri paesi europei in cui questo approccio accademico è più avanzato, la rivista Antincendio, con la collaborazione della Fondazione Egheomai, ed il sostegno della sezione italiana della SFPE, ha pensato di realizzare un progetto che, in questo primo anno di avvio, coinvolgerà giovani professionisti di nazionalità italiana che hanno intrapreso un percorso di studi universitari ed extrauniversitari nel settore della Fire Safety Engineering, partecipando al master internazionale "International Master of Science in Fire Safety Engineering" organizzato congiuntamente dalla Ghent University, Lund University, The University of Edinburgh.

Questo prestigioso percorso di studi ha formato gli studenti preparandoli per attività professionali e di ricerca nel campo della Fire Safety Engineering, permettendo loro di raggiungere un alto grado di conoscenza della materia, anche grazie

all'esperienza congiunta dei tre partner che vantano un ruolo di primo piano nell'ambito della FSE in Europa. Dopo questa prima fase di avvio si prevede di coinvolgere nel programma altri giovani professionisti di nazionalità italiana che abbiano intrapreso analoghi studi in università europee o extraeuropee.

Un progetto per divulgare la FSE La rivista Antincendio, da sempre in prima linea nella divulgazione tecnico scientifica dei contenuti legati alla progettazione antincendio e unico riferimento nel settore in Italia, vorrebbe dare visibilità a questo tipo di esperienza e a coloro i quali l'hanno cavalcata. L'idea è quella di mettere a disposizione uno spazio dedicato allo studio ed all'approfondimento della materia oggetto di questo importante master, mettendo in risalto le competenze raggiunte attraverso questo percorso di studio mediante la pubblicazione di una serie di articoli inediti curati dai partecipanti.

Alla fine dell'anno, gli elaborati pubblicati formeranno oggetto di una raccolta, sia in italiano che in inglese, che sarà successivamente messa a

disposizione degli altri professionisti sul web attraverso i canali di comunicazione della Epc.

Gli articoli, prima della pubblicazione, saranno visionati da un prestigioso Comitato Tecnico Scientifico, rappresentato da esponenti del mondo universitario, dei Vigili del fuoco e di professionisti tecnici dell'antincendio. In particolare, si darà l'opportunità a giovani ingegneri italiani nel mondo (partendo da articoli scritti da ex studenti del Master internazionale sulla Fire Safety Engineering) di presentare studi e applicazioni riguardanti l'uso della FSE nell'ambito della progettazione prestazionale antincendio.

Il pensiero degli esperti

All'iniziativa hanno aderito con entusiasmo alcune delle personalità più in evidenza del panorama nazionale, che abbiamo voluto raggiungere per ascoltare un loro parere sull'iniziativa e raccoglierne gli eventuali suggerimenti per fare di questo progetto, il primo passaggio di ulteriori attività che abbiano il fine di promuovere la cultura dell'Ingegneria Antincendio nel nostro Paese.

L'ingegner **Giuseppe Amaro**, con la sua fondazione Egheomai, è stato fra i promotori dell'iniziativa e a lui chiediamo: "qual è stato lo spunto che l'ha portata a concepire un'iniziativa di questo genere e quali sono le finalità?"

"La materia necessita di essere studiata, approfondita, sviluppata con il contributo della comunità scientifica, del mondo delle professioni e degli utilizzatori, cioè di quei soggetti che fanno parte della filiera che consente di ideare, progettare, realizzare e poi gestire tutte quelle attività, ed in particolare quelle complesse, che necessitano sviluppi e soluzioni progettuali all'avanguardia. È chiaro che per raggiungere e garantire questi obiettivi è necessario disporre di quelle figure professionali che devono partire da una conoscenza ingegneristica proveniente sia dal corso di studio, sia dalla successiva attività di continua formazione, attraverso la conoscenza di cosa la comunità scientifica e quella produttiva mette ogni giorno a disposizione. Credo che l'Italia abbia tutte le conoscenze e competenze, sia nella stessa nazione sia all'estero, che consentano di sviluppare ed avviare questa sfida in modo da non risultare mai secondi a nessuno."

Al progetto ha aderito con entusiasmo anche uno dei più conosciuti esponenti della Fire Engineering a livello europeo, il professor **Enrico Ronchi**, a cui abbiamo domandato: "perché bisogna conoscere e divulgare uno strumento di progettazione come la FSE?"

"È importante promuovere l'uso della FSE da parte degli italiani nel mondo e la FSE stessa, come uno strumento di progettazione più consapevole, in quanto permette di quantificare l'impatto di una data soluzione progettuale sul livello di sicurezza antincendio e di valutare soluzioni ottimali considerando la riduzione del rischio e dei costi di progettazione. Ci si auspica che tale rubrica susciti interesse sia in coloro che già utilizzano la FSE nella loro pratica professionale, ma generi anche curiosità in chi non si è ancora affacciato a questa utile disciplina".

Non poteva mancare il contributo dell'associazione SFPE che, come precedentemente accennato, promuove da sempre in tutto il mondo il ruolo della Ingegneria Antincendio e ne afferma in ogni occasione la assoluta esigenza di sviluppo con rigore tecnico e scientifico al di fuori di ogni compromesso, che può essere drammatico nello sviluppo di una disciplina innovativa come appunto l'Ingegneria Antincendio. Al presidente della Sezione Italiana della SFPE, l'ingegner **Luciano Nigro** abbiamo chiesto: "quali opportunità pensa possano nascere per il nostro Paese da questa nuova iniziativa?"

"Credo sarà relativamente sorprendente per molti degli addetti ai lavori, che seguono costantemente la rivista Antincendio, scoprire, attraverso gli scritti di quei nostri connazionali che hanno creduto nell'Ingegneria Antincendio ed hanno così accettato di trasferirsi in altri paesi europei per seguire questo loro interesse, cosa significhi realmente lo studio dell'Ingegneria Antincendio."

Vedere affrontati degli argomenti inerenti alla sicurezza contro l'incendio con metodologia ingegneristica e non con l'applicazione di regole variamente pubblicate sotto forma di Decreti o Circolari, ritengo possa essere di stimolo per molti di noi ad approfondire queste tematiche e, perché no, a indurre come bisogno dell'utenza quello sviluppo della disciplina dell'Ingegneria Antincendio anche in qualcuno dei nostri Atenei. L'esempio che ci verrà dalla lettura degli scritti dei nostri connazionali che hanno deciso di seguire

questa strada con lo studio in ambito internazionale potrà, a mio avviso, certamente essere di stimolo per tutti i giovani variamente interessati alla materia.”

All'ingegner **Martina Manes**, ricercatrice Associata presso l'Università di Edimburgo, abbiamo chiesto: “quali sono stati i risultati delle ricerche svolte presso l'Università di Edimburgo nel campo dell'Ingegneria Antincendio?”

“Il Fire Safety Group dell'Università di Edimburgo è uno dei centri leader mondiali nella ricerca della FSE. Con oltre 20 ricercatori, si affrontano tematiche che studiano temi come la combustione dei materiali, la prevenzione degli incendi boschivi, le analisi della risposta delle strutture al fuoco e la valutazione degli incendi degli edifici su base statistica di vari paesi del mondo. Le ricerche si basano sia su analisi numeriche che sperimentali. Numerosi progetti includono collaborazioni interdisciplinari con gruppi di ricerca delle scienze sociali e sono utili a determinare non solo l'impatto tecnico della FSE ma anche i possibili coinvolgimenti sociali, economici e organizzativi. Non ultima particolare attenzione viene rivolta alla continua analisi della normativa adottata nella pratica della FSE”.

Abbiamo raccolto anche il parere dell'ingegner **Andrea Lucherini**, ricercatore Associato presso la Ghent University, relativamente all'importanza dello scambio di idee e conoscenze tra gli esperti internazionali e nazionali del settore della Sicurezza Antincendio e la divulgazione dei risultati più avanzati della ricerca scientifica, per comprendere quanto la FSE possa essere di ausilio per la progettazione antincendio.

“L'interdisciplinarietà della progettazione antincendio ne racchiude bellezza e complessità. La FSE spazia attraverso una vasta gamma di specializzazioni e tematiche ingegneristiche: dall'ingegneria strutturale all'impiantistica, dalla chimica alla fluido- dinamica, dalla scienza dei materiali allo studio dei modelli di esodo. Questa marcata interdisciplinarietà proietta la FSE in un'ottica fortemente internazionale, dove lo scambio di idee, conoscenze ed esperienze con esperti ricopre un ruolo fondamentale. Credo che la mia maturazione professionale nel campo sia stata, ad esempio, molto facilitata dall'aver studiato, lavorato e svolto attività di ricerca in tre università leader in materia di progettazione

antincendio (Technical University of Denmark – Danimarca, The University of Queensland – Australia e Ghent University – Belgio). Solo così ho potuto conoscere gruppi di ricerca ed esperti di calibro internazionale nella FSE ed imparare gli approcci ed i metodi scientifici più avanzati ed innovativi. La speranza è che questa iniziativa riesca anche solo in minima parte a trasmettere quella interdisciplinarietà ed internazionalità così essenziali alla Fire Safety Engineering.”

Il Direttore Centrale della Prevenzione e Sicurezza Tecnica del Corpo Nazionale dei Vigili del fuoco, ingegner **Stefano Marsella**, ha messo in evidenza quali sono i principali benefici dell'applicazione della Fire Safety Engineering ed il ruolo esercitato dal Corpo Nazionale sull'introduzione in Italia di questa metodologia.

“Il Corpo nazionale dei Vigili del fuoco è stato uno dei principali motori dell'introduzione in Italia dell'uso dell'approccio prestazionale nella verifica della sicurezza della progettazione antincendio. Il decreto del 9 maggio 2007 è stato pubblicato, infatti, alcuni anni dopo l'avvio dello studio e dei primi esperimenti didattici rivolti al Corpo nazionale.

Gli anni trascorsi dal 2007 hanno consentito di maturare esperienze, consolidare i rapporti con il mondo accademico e della ricerca impegnato nello sviluppo di questa disciplina e, in tempi più recenti, l'integrazione dello strumento ingegneristico con il nuovo approccio normativo, stabilito dal Codice di prevenzione incendi.

Personalmente, ritengo che la parte più coinvolgente di questo approccio risieda nella sua intrinseca necessità di aggiornamento continuo, da parte del normatore, della ricerca e dei professionisti. Le aree di approfondimento delle conoscenze necessarie per le valutazioni prestazionali, infatti, si basano su un numero straordinario di prove di laboratorio e di ricerche già pubblicate ed accettate. Ma esistono altrettanti aspetti che necessitano di approfondimento e di prove. Si pensi, ad esempio, all'impatto delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione sul comportamento umano (soprattutto, ma non solo, in caso di affollamento), o ai rischi di incendio o esplosione connessi alla sostituzione dei combustibili fossili con nuove forme di generazione dell'energia.

Anche la svolta verde impressa dall'Unione Europea alle economie degli stati membri renderà necessario che i professionisti siano in grado di valutare in modo adeguato le condizioni di costruzione e manutenzione delle opere. Sarà necessario, infatti, evitare che il più esteso uso di rivestimenti termici aumenti il rischio per le persone che vivono o si possono trovare negli edifici. Tra gli strumenti più importanti per cogliere questi obiettivi, la diffusione delle informazioni e lo stimolo di un dibattito continuo costituiscono una parte essenziale di questo sforzo e, quindi, vanno incoraggiate tutte le iniziative, come quella proposta sulla "Sfida europea alla FSE", che diffondono idee e stimolano il dibattito".

Il corpo Nazionale ha lavorato, soprattutto in questi ultimi anni, per snellire i procedimenti di prevenzione incendi, e a questo proposito, abbiamo domandato all'ingegner **Emanuele Gissi**, Comandante dei Vigili del fuoco di Savona, che si è spesso occupato della materia: "L'uso della FSE è previsto anche dal Codice di Prevenzione Incendi: non più norme vincolanti, ma soluzioni personalizzate al singolo caso, permettono di ridurre i costi di adeguamento e di eliminare molte limitazioni alle attività?"

"Il Codice si propone con strumento flessibile in tutte le sue parti, tramite l'applicazione di soluzioni alternative (commi 1 e 2 del paragrafo G.2.6.5.2) o di livelli di prestazione alternativi (comma 4 del paragrafo G.2.6.4). Ciò consente pertanto di creare progettazioni atte a ridurre ad accettabile il rischio di incendio per la specifica attività, impiegando sistemi innovativi o anche semplicemente considerando quelle caratteristiche favorevoli già presenti gratuitamente nei locali, come l'incombustibilità dei materiali di rivestimento esistenti, le ampie geometrie, la ridotta presenza di occupanti, ...Naturalmente il progettista è tenuto a dimostrare la validità della soluzione adottata, ad esempio adottando i metodi quantitativi dell'ingegneria della sicurezza antincendio. Aggiungo inoltre che anche le soluzioni conformi offerte nel testo altro non sono che risultati delle medesime valutazioni quantitative svolte dal normatore. Quindi anche i progettisti che si accontentano di applicare ai loro progetti soluzioni conformi e livelli di prestazione secondo criteri d'attribuzione generali stanno ora implicitamente sfruttando risultati precalcolati di ingegneria della sicurezza antincendio, evitando la relativa

complessità dell'applicazione diretta. In sintesi, per il nostro Paese il Codice rappresenta la transizione integrale e definitiva all'applicazione dell'ingegneria della sicurezza al generale problema antincendio ed alla conseguente flessibilità illimitata delle soluzioni tecniche"

Il Comitato Tecnico Scientifico

- **Prof. Enrico Ronchi**, Professore associato presso la Lund University
- **Ing. Martina Manes**, Ricercatrice associata presso University of Edinburgh
- **Ing. Andrea Lucherini**, Ricercatore associato presso Ghent University
- **Ing. Stefano Marsella**, Direttore Centrale Prevenzione e Sicurezza Tecnica Vigili del fuoco
- **Ing. Emanuele Gissi**, Comandante Vigili del fuoco di Savona
- **Ing. Luciano Nigro**, Presidente Sezione Italiana SFPE

Segreteria tecnica di coordinamento: **Ing. Ada Malagnino** (R&D Project Manager – GAEngineering)

The European challenge of Fire Safety Engineering in Italy

Written by Flaminia Ciccotti

Abstract

The *Antincendio* magazine, from July 2021, dedicates a section to the Fire Safety Engineering. This is a project, conceived together with the Egheomai Foundation and with the support of the Italian section of the SFPE, which will involve young Italian professionals who have undertaken a university and extra-university studies by participating to the international master "International Master of Science in Fire Safety Engineering", jointly organized by Ghent University, Lund University, The University of Edinburgh. The skills acquired by attending this course will be highlighted through the publication of a series of original papers in Italian and English language, written by the participants. Before publication, the papers will be reviewed by a prestigious Technical Scientific Committee.

The introduction of Fire Safety Engineering in Italy, starting from the end of the 90's, represented a fundamental step for the evolution of the performance-based approach in our country and was substantially in line with what was happening in the rest of the advanced countries.

Italy is a country with a strong "legislative/regulatory" vocation and the professionals of the field experienced this step as a further change in legislation. The FSE was seen by them as a mean for solving complex problems rather than as a cultural transition from which there would be no turning back. The main consequence of this misunderstanding was the failure to perceive that the introduction of the FSE did not simply require knowledge and new tools for the fire prevention procedures, but a cultural change and the start of a new discipline: the "Fire Safety Engineering". However, the national academic world, unique in the international panorama, did not perceive such a change.

The isolation of Italy in the European panorama

There are still few examples of courses, or parts of them, included here and there in Engineering or Architecture degree courses, and a Fire Safety

Engineering faculty does not exist in any national university yet.

In this respect, it must be recognised the fact that we are substantially different from other European countries, where there are Fire Safety Engineering Faculties. These were set according to the FSE tradition, which started in the 80's between Maryland and Washington in the United States and especially in prestigious Research Institutes such as the NIST (National Institute of Standards and Technology). In those years, the SFPE, the Society of Fire Protection Engineers, took its first steps as an independent association from the NFPA. Today the SFPE celebrates its first 50 years of activity and, with the introduction of the Handbook of Fire Protection Engineering, now at the 6th edition, it highlighted the importance of fire protection engineering. The Fire Safety Engineering is changing the way the fire science is seen, shifting from a "prescriptive discipline", characterized by a poor knowledge of fire phenomena, to a quantitative one.

The required Core Competencies for Fire Safety Engineering

One of the latest international campaigns launched by the SFPE is for the definition of the Core Competencies, the essential skills to operate in the fire engineering field. An 8 pages document downloadable from the SFPE website (www.sfpe.org) summarizes most of the knowledge required to be a valid "fire engineer".

Basically, the knowledge of chemistry, physics, chemistry-physics, thermodynamics, fluid dynamics, but also behavioral science, crowd dynamics, fire control and suppression technologies, etc. characterizes the "fire engineer" as a professional figure as it seen all over the world.



In order to enhance the knowledge about the FSE in Italy and the interaction between Italian professionals and the fire engineers in other European countries, the magazine *Antincendio*, with the collaboration of the Fondazione Egheomai and the support of the Italian section of SFPE, aims to implement a project that will involve, during the first year, young Italian professionals who have undertaken university and non-university studies in the field of Fire Safety Engineering (FSE) by participating in the “International Master of Science in Fire Safety Engineering” programme, jointly organized by Ghent University, Lund University and The University of Edinburgh.

This prestigious course has trained the students preparing them for professional activities and research in the field of Fire Safety Engineering, allowing them to reach a high level of knowledge of the subject, also thanks to the joint experience of the three partners who have a leading role in the FSE in Europe. After this first start-up phase, other young Italian professionals who have

undertaken similar studies in European or non-European universities will be involved.

A project to disseminate the knowledge of FSE

The “*Antincendio*” magazine has always been at the forefront for the technical and scientific dissemination of Fire Safety Engineering related topics. It is the only reference point for the sector in Italy and it intends to give visibility to this type of experience and involved professionals.

The objective is to provide a dedicated space for an in depth discussion about the topics of the master course. The skills acquired by attending this course will be highlighted through the publication of a series of original papers in Italian and English language, written by the participants.

At the end of the year, the published papers will be collected in a volume that will be subsequently made available to other professionals on the internet via all the EPC's communication channels.

Before publication, the papers will be reviewed by a Technical Scientific Committee (TSC) represented by experts from Academia, the Fire-fighting Corps and Fire Safety professionals.

In detail, the opportunity to present studies and applications about the use of the FSE for performance-based design will be given to young Italian engineers around the (starting from papers written by ex-students of the Master of Science in Fire Safety Engineering).

The opinion of the experts

Some of the most prominent personalities of the national scene enthusiastically joined the project. We wanted to ask them their opinion and collect suggestions to make this project the first step of further activities with the aim of promoting the culture of Fire Safety Engineering in our country.

Giuseppe Amaro and his foundation Egheomai, was one of the project promoter, and we asked him: "What was the impetus that led you to conceive such an initiative and what are the goals?"

"The subject needs to be further studied, developed with the contribution of the scientific community, professionals and end users, namely of the stakeholders that are part of the chain that allows to conceive, design, develop and manage activities, specifically the complex ones, that need cutting-edge solutions. It is clear that to address and guarantee the achievement of these objectives, it is necessary to have those professional figures able to apply the engineering knowledge acquired during the studies and, subsequently, through continuous training on what the scientific community and the industrial one provide every day. I believe that Italy has all the required knowledge and skills, within the national borders and abroad, to start and develop this challenging project in order to be second to none."

The project was also joined by one of the most known representatives of FSE at a European level, Professor **Enrico Ronchi**. We asked him: "Why is it important to make a design approach such as the FSE well known?"

"It is important to promote the use of the FSE by Italians around the world and the FSE itself, as a more informed design approach. This is because it allows to quantify the impact of a specific design solution in relation to fire safety and to evaluate optimal solutions, considering the reduction of risks and design costs. I hope that this section in the Antincendio magazine generates interest both

in people that already apply the FSE in their professional life and in those that do not know this useful discipline yet."

We could not miss the contribution of the SFPE association which, as previously mentioned, has always promoted the role of Fire Safety Engineering all over the world and has always stated the absolute need for rigorous technical and scientific development without any compromise, which can be dramatic for the development of an innovative discipline such as Fire Safety Engineering. We asked to the President of the Italian Section of SFPE, **Luciano Nigro**: "Which opportunities do you think can arise for our country from this new project?"

"I think it will be relatively surprising to many of the people in the field, who constantly read the Antincendio magazine, to find out, through the papers of our compatriots who have believed in Fire Safety Engineering and have thus agreed to move to other European countries to follow this interest of theirs, what the study of Fire Safety Engineering really means."

I think that knowing about topics related to fire safety faced by applying an engineering methodology and not by the application of rules variously published in the form of Decrees or Circulars can be a stimulus for many of us to deepen these issues and, why not, to induce the need for the development of the Fire Engineering discipline in some of our universities as well. The example that will be given by papers written by compatriots who decided to study the FSE in an international context can, in my opinion, certainly be a stimulus for all young people variously interested in the subject".

We asked **Martina Manes**, Research Associate at the University of Edinburgh, "Which results have been achieved through the research carried out at the University of Edinburgh in the field of Fire Engineering?"

"The Fire Safety Group at the University of Edinburgh is one of the world's leading centers for FSE research. With over 20 researchers, they address topics that study issues such as burning materials, forest fire prevention, analyses of structure response to fire, and building fire assessment on a statistical basis from various countries around the world. Research is based on both numerical and experimental analyses."

Many projects include interdisciplinary collaborations with social science research groups, which are useful in determining not only the technical impact of FSE but also the possible social, economic and organizational implications. Last but not least, particular attention is paid to the continuous analysis of the legislation adopted in the practice of FSE."

We also report the opinion of Andrea Lucherini, Research Associate at Ghent University, regarding the importance of the exchange of ideas and knowledge between international and national experts in the field of Fire Safety and the dissemination of the most advanced results of scientific research, to understand how the FSE can be of help for fire design.

"The interdisciplinary nature of fire design encapsulates its beauty and complexity. The FSE ranges across a wide range of engineering specializations and subjects: from structural engineering to plant engineering, from chemistry to fluid dynamics, from materials science to the study of escape models. This marked interdisciplinarity FSE projects in a strongly international perspective, where the exchange of ideas, knowledge and experience with experts plays a fundamental role. I believe that my professional maturation in the field has been, for example, greatly facilitated by studying, working and carrying out research activities in three leading universities in the field of fire design (Technical University of Denmark - Denmark, The University of Queensland - Australia and Ghent University - Belgium). This is the only way I was able to meet research groups and experts of international caliber in FSE and learn the most advanced and innovative scientific approaches and methods. My hope is that this project will succeed, even minimally, to convey the message that interdisciplinarity and internationality are essential to Fire Safety Engineering."

The Central Director of Prevention and Technical Safety of the National Fire Brigade Corps, **Stefano Marsella**, highlighted the main benefits of the application of Fire Safety Engineering and the role played by the National Corps in the introduction of this methodology in Italy.

"The National Fire Department has been one of the main drivers for the introduction of the use of the performance approach in Italy, to verify the fire

design. In fact, the decree of May 9, 2007, was published a few years after the beginning of the studies and the first educational experiments for the National Corps.

Since 2007, we have been gaining experience, consolidating relations with the academic and research world involved in the development of this discipline and, more recently, we have been integrating the performance-based approach with the new regulatory approach established by the Fire Prevention Code.

Personally, I believe that the most engaging part of this approach lies in its inherent need for continuous updating, by the legislators, researchers, and practitioners. In fact, the areas of in-depth knowledge required for performance-based evaluations rely on an extraordinary amount of laboratory tests and research that have already been published and accepted. But there are just as many aspects that need further study and testing. Think, for example, about the impact of information and communication technologies on human behavior (especially, but not only, in crowd dynamics), or the fire or explosion risks associated with the replacement of fossil fuels with new forms of energy generation.

The green aspect, highlighted by the European Union for the economies of member states will make it necessary for professionals to be able to properly assess the state of construction and maintenance activities. It will be necessary, in fact, to avoid that the more extensive use of thermal coatings increases the risk for people in buildings. Among the most important tools to achieve these goals, the dissemination of information and the stimulation of an ongoing debate are an essential part of this effort and, therefore, should be encouraged all initiatives, such as the proposed "The European Challenge of FSE", which disseminate ideas and stimulate debate "

The National Fire Brigade Corps has been working, especially in recent years, to streamline fire prevention procedures, and in this regard, we asked **Emanuele Gissi**, Commander of the Fire Department of Savona, who has often dealt with the subject: "The use of the FSE is also mentioned by the Fire Prevention Code: no longer binding rules, but solutions tailored to the individual case. Do these solutions allow to reduce the costs required to make a building compliant with the

regulations and eliminate many limitations for building occupancies?"

"The Code is proposed as a flexible tool in all its parts, through the application of alternative solutions (paragraphs 1 and 2 of section G.2.6.5.2) or alternative performance levels (paragraph 4 of section G.2.6.4). This makes it possible to create design solutions that reduce the fire risk to an acceptable level for the specific activity, using innovative systems or even simply considering those favorable characteristics already present in the premises, such as the non-combustibility of existing cladding materials, the large geometries, the reduced presence of occupants, ... Of course, the designer is required to demonstrate the validity of the adopted solution, for example by applying quantitative methods of Fire Safety Engineering. I would also like to add that the solutions provided by the Code are the result of the same quantitative evaluations carried out by the regulator. Therefore, even designers who just apply compliant solutions and adopt performance levels according to general assignment criteria are now implicitly using pre-calculated results from the Fire Safety Engineering, avoiding the relative complexity of direct application. In summary, for our country, the Code represents the integral and definitive transition to the application of safety engineering to the general fire safety problem and the resulting unlimited flexibility of technical solutions."

The Technical Scientific Committee

- **Enrico Ronchi**, associate professor at Lund University
- **Martina Manes**, associate researcher at the University of Edinburgh
- **Andrea Lucherini**, associate researcher at Ghent University
- **Stefano Marsella**, Central Director of Prevention and Technical Safety of the National Fire Brigade Corps
- **Emanuele Gissi**, Commander of the Fire Department of Savona
- **Luciano Nigro**, President of the Italian Section of SFPE

Responsible for the technical coordination secretariat: **Ada Malagnino** (R&D Project Manager – GAe Engineering)

- 1 L'analisi del rischio volta alla protezione del patrimonio culturale – caso studio
Risk analysis aimed at the protection of cultural heritage - case study

L'ANALISI DEL RISCHIO VOLTA ALLA PROTEZIONE DEL PATRIMONIO CULTURALE – CASO STUDIO

AUTHOR: Giovanni Cosma, Senior Fire Engineer e Team Coordinator - Jensen Hughes Continental Europe

BIO

Laureato in Fire Safety Engineering con un corso di studi internazionale presso tre principali università europee in ambito della ingegneria antincendio (IMFSE), grazie alla quale ha sviluppato una vera e propria passione per questo ramo di ingegneria, ha maturato un'esperienza internazionale che riguarda la progettazione di sistemi e strategie antincendio con approccio prestazionale. Subito dopo gli studi, ha iniziato l'esperienza lavorativa, sempre in ambito internazionale, iniziando a lavorare come consulente per un'azienda britannica specializzata in sistemi di evacuazione fumi e calore. Successivamente, nel rientro in Italia in anni più recenti, ha continuato a lavorare come consulente antincendio focalizzandosi sulla progettazione di sistemi di ventilazione del fumo e del calore, sulle analisi fluidodinamiche di tipo CFD e sulla progettazione dei sistemi antincendio con metodo prestazionale.

ABSTRACT

Attraverso le tecniche del “fire risk assessment”, è possibile impostare un'analisi del rischio d'incendio per qualsiasi edificio, contestualizzando il suo contenuto, occupanti e sistemi di controllo d'incendio, con l'intenzione di determinare la frequenza e le possibili conseguenze di determinati scenari d'incendio e valutare l'eventuale necessità di individuare misure compensative necessarie per ridurre eventuali rischi inaccettabili.

Il seguente caso studio utilizza le logiche e le impostazioni del risk assessment per individuare e analizzare le possibili configurazioni di rischio che si possono

verificare in prossimità di un imponente reperto di natura lignea conservato all'interno del padiglione espositivo aeronavale del Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo da Vinci, a Milano, andando a valutare, in maniera qualitativa, la probabilità di accadimento e le possibili conseguenze. L'analisi è stata eseguita partendo da (a) l'identificazione dei possibili pericoli d'incendio che possono interessare il reperto in esame, (b) la descrizione e valutazione delle misure di controllo, passive ed attive esistenti, e valutarle se sufficienti a minimizzare il rischio d'incendio all'interno del padiglione aeronavale, (c) la descrizione delle procedure in essere in quanto a (i) pianificazione delle emergenze, (ii) controlli e manutenzioni e (iii) formazione e informazione del personale, (d) l'identificazione dei possibili interventi di miglioramento per il controllo del rischio residuo e il relativo programma di attuazione.

Nell'ambito dell'analisi eseguita, particolare attenzione è stata poi rivolta alla valutazione tecnica dell'adeguatezza degli impianti antincendio esistenti, analizzandoli essenzialmente da un punto di vista documentale ma soprattutto da un punto di vista prestazionale, al fine di valutarne la consistenza in relazione agli standard di riferimento adottati.

INTRODUZIONE

La valutazione del rischio d'incendio viene definita come un processo attraverso il quale vengono determinati i livelli di rischio, le azioni e le misure di compensazione per minimizzare il rischio specifico di incendio per una determinata attività, per un edificio o per una semplice lavorazione. L'analisi del rischio può essere condotta tramite due metodologie diverse: un'analisi di tipo qualitativo oppure di tipo quantitativo. La prima usa una scala

relativa o descrittiva per misurare la probabilità di accadimento e le conseguenze derivanti da un determinato rischio, mentre la seconda, utilizza una scala numerica che permette di quantificare più dettagliatamente i rischi identificati ottenendo dei risultati classificabili a seconda delle soglie di accettabilità prescelte. In generale, attraverso un'attenta analisi dei dati disponibili e utilizzando un approccio di tipo matematico, il rischio d'incendio è definito, in modo semplice ed accessibile, come il prodotto fra la probabilità di accadimento e le conseguenze dell'accaduto. Il presente studio ha come scopo quello di valutare le diverse configurazioni di rischio d'incendio, e le probabili conseguenze del suo sviluppo, che si possono verificare in prossimità di un importante reperto museale, un brigantino-goletta, conosciuto anche come Brigantino EBE, costruito completamente in legno nella prima metà del 1900, conservato all'interno del padiglione aeronavale del Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo da Vinci, dove sono esposte diverse installazioni e manufatti di altissimo pregio e valore.

dell'incertezza e la valutazione del rischio in ambito antincendio. Il documento fornisce una base concettuale generale illustrando quei principi d'analisi del rischio applicabili a tutti i fenomeni e a tutte le configurazioni d'incendio all'interno di un determinato ambiente. Secondo questo documento normativo di origine internazionale, la valutazione del rischio è principalmente costituita da due fasi: la prima è indirizzata alla definizione di un contesto, compresi gli obiettivi di sicurezza antincendio da soddisfare e le relative ipotesi associate al contesto stesso; la seconda fase invece è finalizzata all'identificazione dei vari rischi e la loro analisi.

Fra i rischi cui il reperto è esposto, l'incendio rappresenta quello forse più rilevante stante la natura lignea dello stesso e la costruzione particolarmente "aerata" che ne consentirebbe la combustione in maniera piuttosto rapida e violenta.

Grazie alle tecniche d'analisi del rischio e di definizione degli scenari d'incendio si è potuto definire delle soluzioni progettuali per la salvaguardia di un reperto conservato all'interno del padiglione museale, visitato da un gran numero di persone che possono

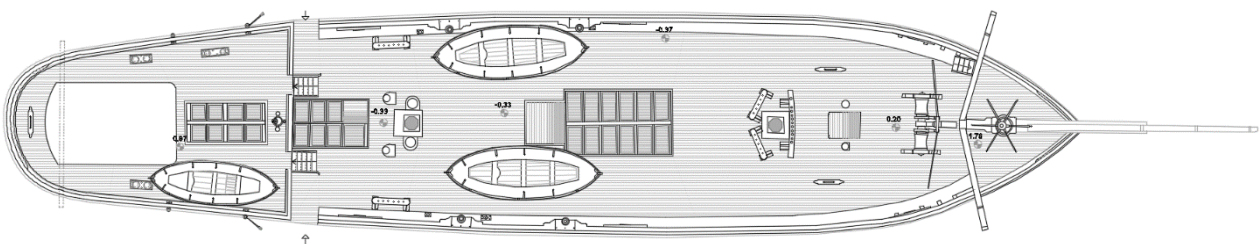


Figura 1 - Planimetria sovracoperta Brigantino analizzato

ANALISI

L'analisi è stata eseguita facendo riferimento alla valutazione dei rischi di tipo qualitativo secondo la norma UNI ISO16732 – *Fire Risk Assessment*. Questo documento viene usato dai professionisti della sicurezza antincendio per la rappresentazione matematica

avvicinarsi ad esso fino anche a toccarlo. L'oggetto dell'analisi è quello di valutare i possibili scenari incidentali che possono verificarsi in prossimità del reperto esibito, valutandone i rischi in termini di probabilità e conseguenze. L'analisi prende in esame eventi come scenari di incendio doloso che possono sempre verificarsi in un luogo

accessibile a grandi quantità di persone, scenari d'incendio basati sulla statistica di episodi già accaduti per ambienti a destinazione d'uso analogo, e scenari d'incendio che includono la possibile esecuzione di lavori di manutenzione più o meno rilevanti o di ristrutturazione.

pennoni, a poppa l'albero maestro. Il reperto include inoltre un apparato motore diesel da 150 kW (200 hp) di tipo Ansaldo Genova O265/4. Nei recenti anni è stato deciso di alleggerire il carico strutturale del reperto andando a rimuovere le vele quadre a prua e auriche a poppa.

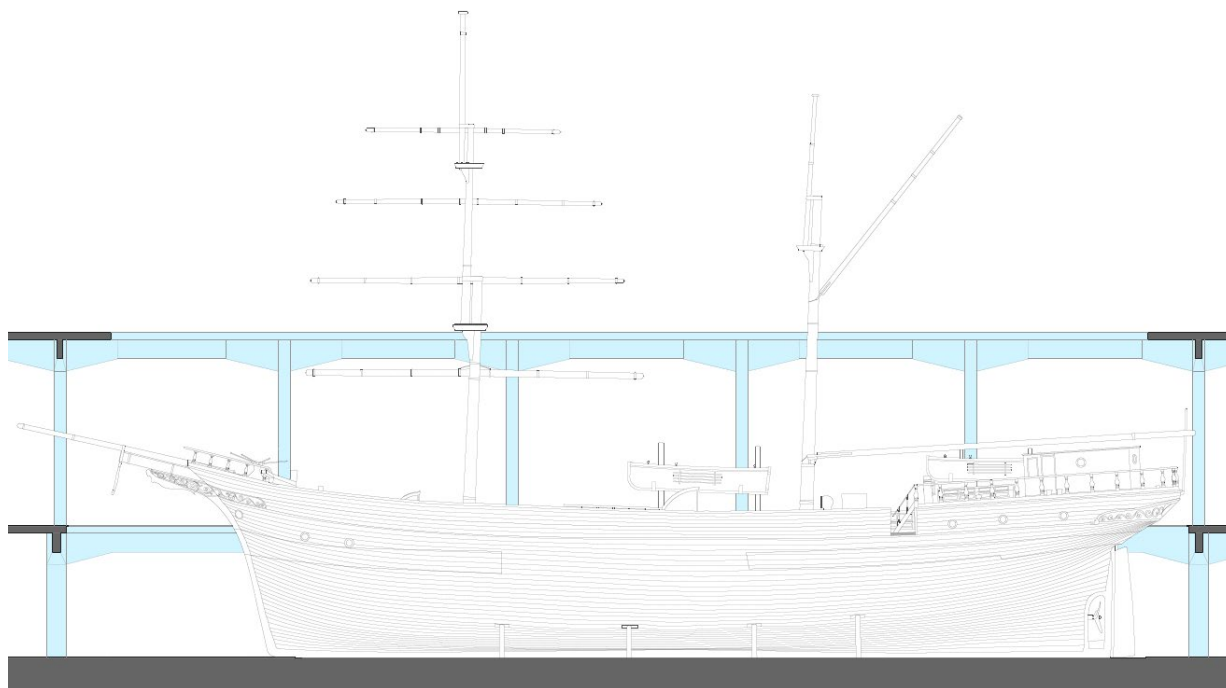


Figura 2 - Prospetto babordo del Brigantino analizzato

La costruzione del brigantino EBE è interamente in legno ed è caratterizzato da una “coperta” accessibile dai percorsi espositivi, ma normalmente vietata al pubblico, da una stiva ad altezza d'uomo e da una sentina piuttosto ridotta ma che costituisce comunque un volume separato rispetto al resto. Nello specifico, i materiali principali che compongono il brigantino sono rovere e pino domestico per lo scafo, e pitch pine (pino rigido), abete rosso e abete bianco per gli alberi. Il reperto presenta un ponte unico di lunghezza 40,3 m (complessivamente di 50,5 m fuori tutto) e una larghezza pari a 8,4 m [1]. Le pareti sono a fasciame affiancato calafatato a due strati in quercia. Il brigantino-goletta presenta due alberi più il bompresso, a prora l'albero di trinchetto con 4 ordini di

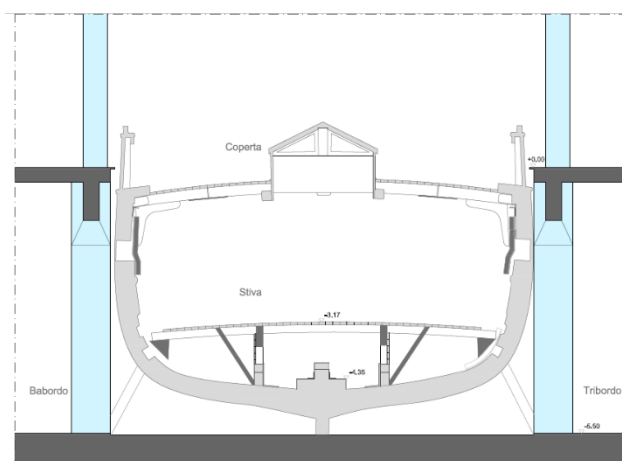


Figura 3 - Sezione trasversale del brigantino analizzato

Il Brigantino è completo in ogni sua parte anche se ogni contenuto di arredi e di tipo impiantistico è stato rimosso. Sono ancora in esso presenti i motori che ne assicuravano il

movimento [2]. Non vi sono invece impianti tecnici di alcun tipo ad eccezione di un impianto di illuminazione, realizzato in varie fasi della vita del reperto e ad oggi non in più in funzione, ed un impianto di rivelazione d'incendio realizzato con sensori puntiformi.

Il padiglione aeronautico del Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo da Vinci, dove il Brigantino è ospitato, è caratterizzato da strutture portanti orizzontali e verticali in calcestruzzo, realizzato nella prima metà degli anni '60, con una copertura piuttosto articolata come forma e posta ad un'altezza di circa 30 m dal piano dove si trova il Brigantino stesso, che è perfettamente inserito fra due file di colonne che lo tengono in posizione corretta verticale in aggiunta ad ulteriori cavalletti metallici posti a sostegno dello scafo [3].

L'edificio è caratterizzato da pilastri portanti in cemento armato cruciformi e pareti di tamponamento in tavole di laterizio. Le separazioni, dal punto di vista antincendio, all'interno del padiglione aeronavale non sono sostanziali. Infatti, l'edificio si sviluppa su quattro piani di cui due fuori terra e due interrati. Tutti i piani accessibili al pubblico, ovvero quota -5.50, +0.00 e +8.00 sono tra loro intercomunicanti realizzando, di fatto, un unico compartimento. Intorno al Brigantino sono posizionati altri reperti che presentano un simile livello di combustibilità ma che sono posti ad una distanza significativa rispetto al Brigantino stesso (ca.2-3 m). Unica eccezione rimane la quota -5.50, sul lato a babordo del brigantino, dove sono esposti altri reperti a distanza ravvicinata, e dove sono presenti aree dedicate ad attività museali quali workshop ed eventi.

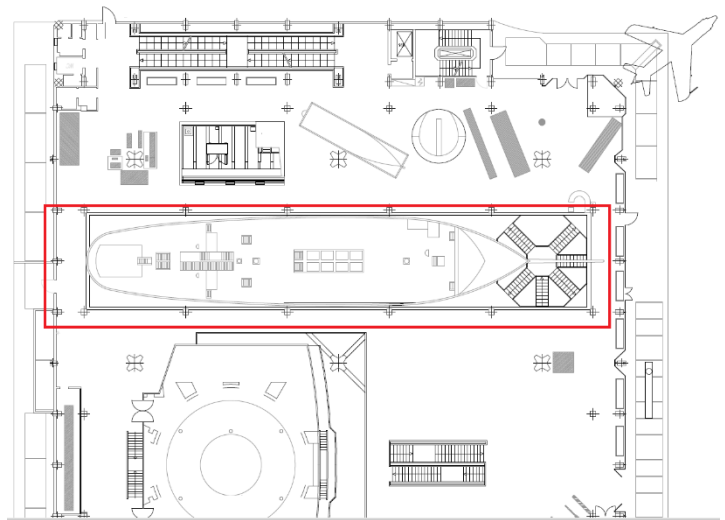


Figura 4 - Posizione del Brigantino analizzato all'interno del padiglione a quota +0.00

ANALISI DEI MATERIALI

Nell'istante in cui l'elemento costruttivo in legno è esposto al fuoco, si innesca un processo di carbonizzazione nel quale la sezione trasversale dell'elemento stesso viene a ridursi andando a formare uno strato carbonizzato. In aggiunta a questo processo di carbonizzazione dell'elemento ligneo, la capacità strutturale dell'elemento stesso viene influenzata dall'elevato gradiente di temperatura nella porzione dell'elemento non direttamente esposta al fuoco [4]. Dunque le caratteristiche di resistenza al fuoco degli elementi lignei esposti ad incendio sono condizionate da diversi fattori quali gli effetti isolanti dello strato carbonizzato, la densità e il tasso d'umidità del materiale, e dall'elevato gradiente di temperatura che si viene a formare sotto la base dello strato di carbone. Stabilire la velocità del processo di carbonizzazione risulta di fondamentale importanza per determinare la resistenza al fuoco dei vari elementi strutturali, poiché lo strato carbonizzato non ha capacità portante. I metodi più efficaci per migliorare la sicurezza antincendio per strutture lignee sono le azioni

preventive che riducono la possibilità di innesco [4].

A temperature superiori a 100°C-150°C, la robustezza degli elementi lignei inizia a diminuire. Tale fenomeno di reazioni di depolimerizzazione dipende dal contenuto di umidità, dal mezzo di riscaldamento, dal periodo di esposizione e dalla tipologia di legno analizzato. Diversi studi di carattere internazionale [5] hanno evidenziato che i legami chimici presenti nei materiali lignei iniziano a rompersi a temperature poco superiori a 100°C. Tra 100°C e 200°C, il legno si disidrata e genera vapore acqueo e altri gas non combustibili tra cui CO₂, acido formico, acido acetico e H₂O. Con esposizioni prolungate a temperature più elevate, il legno inizia il processo di carbonizzazione. Tra i 200°C e i 300°C, alcuni componenti del legno iniziano a subire un processo di pirolisi significativo, con una produzione importante di CO.

SCENARI D'INCENDIO

Dalle statistiche reperibili in letteratura degli ultimi anni [6], è stato possibile individuare degli scenari d'incendio secondo le possibili cause principali d'innesco che possono coinvolgere imbarcazioni navali. In relazione a tutte le condizioni di esercizio ragionevolmente prevedibili per l'oggetto in esame, sono stati individuati i seguenti Eventi Iniziatori E.I. (principi di incendio), tenendo conto anche degli incendi che hanno storicamente interessato attività simili a quella in esame:

- E.I.1 Principio di incendio innescato da apparecchiature elettriche o da apparecchi illuminanti sia di tipo mobile (temporaneo) che d'installazione fissa;
- E.I.2 Principio di incendio innescato da sigaretta o simile;

- E.I.3 Principio di incendio doloso;

Per ciascuno degli eventi iniziatori sono poi

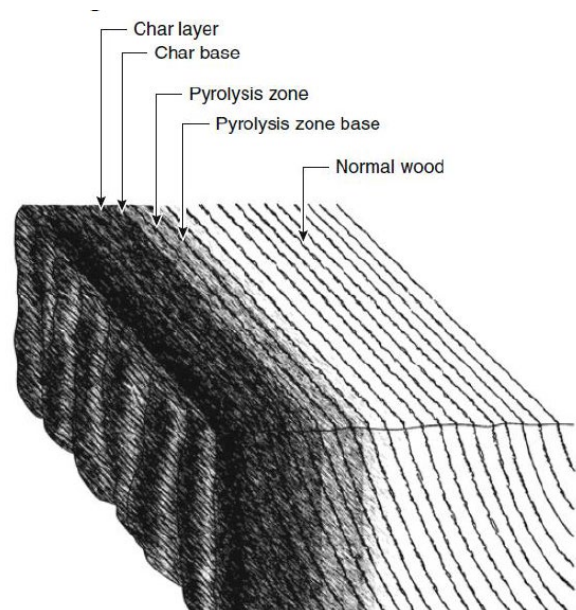


Figura 5 - Schematizzazione del processo di carbonatazione di materiali lignei

stati individuati dei possibili eventi successivi ("innesco di ..."), sulla base dei quali sono stati identificati i seguenti eventi conclusivi ("incendio di ...") ed i conseguenti alberi degli eventi (A.d.E.). L'albero degli eventi scaturito dagli eventi iniziatori indicati al precedente paragrafo possono così essere riassunti e raggruppati (scenario clusters):

- A.d.E.1 - Incendio posizionato sottocoperta (all'interno) del Brigantino
- A.d.E.2 - Incendio posizionato sul ponte superiore del Brigantino
- A.d.E.3 - Incendio posizionato a quota +0.00 in prossimità dello scafo del Brigantino
- A.d.E.4 - Incendio originato a quota - 5.50 in prossimità dello scafo del Brigantino

CONSEGUENZE POSSIBILI

Nel caso di innesco di materiale combustibile all'interno del reparto in esame (A.d.E.1), che sia di natura elettrica, o che sia un innesco di origine dolosa, l'incendio si propagherebbe a

diversi elementi lignei, quali colonne e altri elementi strutturali presenti all'interno del reparto, nel giro di pochi minuti. La capacità di propagazione della fiamma su materiali lignei può variare in base a diversi fattori quali l'orientamento del materiale combustibile, la direzione del flusso dei gas combusti e l'umidità contenuta nel materiale ligneo. Nell'eventualità di un incendio all'interno del reparto, dati i volumi ridotti della sottocoperta, si avrebbe anche un processo di blocco e feedback termico da parte dello scafo e del soffitto (principalmente composti da quercia e pino) [4], il quale porterebbe ad un aumento più rapido delle temperature, e quindi a un aumento dell'irraggiamento termico, anche su quelle superfici non sottoposte direttamente a fiamme libere, risultando quindi in una condizione di propagazione delle fiamme facilitata, con un irraggiamento critico per un ulteriore innesco ridotto, fino ad arrivare a condizioni di flashover nel giro di 7-10 minuti ed un eventuale perdita dell'intero reparto. La potenza di rilascio termico necessaria per raggiungere condizioni di flashover è stata calcolata col metodo di McCaffrey, Quintiere e Harkleroad [7]:

$$Q_{FO} = 610(h_k A_T A_0 \sqrt{H_0})^{0.5}$$

Dove h_k è un coefficiente di scambio termico conduttivo effettivo del volume analizzato ($\text{kW/m}^2\text{K}$), A_T è la superficie totale dell'ambiente che permette lo cambio di calore (m^2), A_0 e H_0 sono la superficie totale e l'altezza totale ponderate di tutte le aperture presenti all'interno dell'ambiente analizzato (m).

Nel caso di innesco di materiale combustibile sul pontile del Brigantino (A.d.E.2) l'incendio si propagherebbe più lentamente poiché vi sarebbe una dispersione termica maggiore rispetto all'ipotesi d'incendio precedente.

Tuttavia, lo svilupparsi dell'incendio porterebbe ad una plausibile propagazione di fiamme verso gli alberi e verso i parabordi del brigantino, anch'essi di natura lignea. Si riporta di seguito il caso storico di un reparto analogo a quello in esame: quello della Cutty Stark, un clipper inglese con stazza di 963 tonnellate, di lunghezza pari a 64,6 m e larghezza 10,94 m, esposto presso il Maritime Greenwich World Heritage, Londra [8]. Nel maggio 2007, lo storico veliero è stato seriamente danneggiato da un incendio durante un lavoro di restauro dello scafo. Secondo la ricostruzione degli investigatori, il motore di un'aspirapolvere dimenticato acceso per due giorni dagli operai addetti al restauro ha provocato il divampare delle fiamme. Il ponte superiore è stato completamente perduto così come la gran parte di quelli inferiori. Inoltre, al momento dell'incidente non scattò l'allarme antincendio e non fu possibile utilizzare gli estintori, provvisoriamente rimossi dagli addetti ai lavori. Il mancato allarme aveva inoltre ritardato l'intervento da parte dei vigili del fuoco amplificando il danno complessivo causato dall'evento.

Si deve quindi ipotizzare che anche l'incendio divampato sul ponte di coperta, o in prossimità del castello o del cassero, porterebbe a ingenti danni al reparto con una propagazione sostanziale dell'incendio.

Nel caso poi di incendio causato da un oggetto posizionato in prossimità del perimetro dell'oggetto in esame a quota +0.00 (A.d.E.3), poiché vi sono ulteriori reperti in esposizione di natura combustibile ad una distanza di c.a 2,1 m dallo scafo del brigantino, si potrebbe avere una diretta esposizione del reparto principale con potenziale innesco. Per maggiore precisione si è voluto calcolare la potenza termica minima necessaria per innescare un principio d'incendio sul

brigantino stesso secondo il metodo semplificato di Modak [9].

$$\dot{q}''_{crit} = \frac{\chi_r \dot{Q}}{4\pi R_0^2}$$

Dove (q''_{crit}) è l'irraggiamento termico critico (pari a 10 kW/m², tipico per materiali lignei [7] ed χ_r è la frazione di energia rilasciata dall'incendio come radiazione termica (calcolata come 30%) [10]. Considerando una distanza (R_0) di separazione tra lo scafo del brigantino e gli altri reperti pari a 2,1 m, la potenza termica risultante di c.a 1'650 kW. Tale valore è ritenuto facilmente raggiungibile dai reperti esposti attorno al brigantino poiché costituiti da materiali lignei come betulla, abete, e legno compensato, i quali con uno spessore di circa 10 mm, densità variabile tra 530 e 600 kg/m³ con rateo di umidità circa del 10%, potrebbero generare potenze termiche e temperature sufficienti per innescare un incendio sul brigantino per irraggiamento.

In maniera analoga a quanto descritto precedentemente, nel caso in cui un possibile incendio coinvolga dei reperti esposti al piano -5.50 in prossimità dello scafo dell'oggetto in esame, data la posizione "favorevole" dell'incendio, e data la natura ascensionale del calore, si raggiungerebbero temperature critiche di autoaccensione (o di indebolimento strutturale) dei materiali lignei nel giro di qualche minuto. Utilizzando il modello del pennacchio di fumo di Zuckosky [9], è stato possibile calcolare l'andamento delle temperature a diverse altezze sullo scafo del brigantino. Avendo ipotizzato una separazione verticale tra il focolaio e lo scafo di $z = 2.2 - 4.3$ m, e ponendo una potenza di rilascio termico Q pari a 1150 kW, come media dei picchi delle curve HRR di diversi test in scala reale effettuate su sedie in legno, in plastica e in metallo, le temperature risultanti sono state individuate tra i 152°C-420 °C.

PROBABILITA' DI ACCADIMENTO

Alla valutazione delle conseguenze di cui si è detto sopra segue la valutazione degli aspetti di probabilità di accadimento degli eventi incidentali identificati; anche in questo caso si possono definire alcuni livelli di riferimento che, nello studio presente, sono stati ipotizzati in tre livelli:

Improbabile: è un evento che dipende dal verificarsi di numerose e diverse manifestazioni sfavorevoli (o dannose), che devono avvenire contemporaneamente e che di base sono tra di loro indipendenti.

Poco probabile: è un evento che dipende dal verificarsi di numerose manifestazioni sfavorevoli (o dannose), che devono avvenire contemporaneamente, e che sono dipendenti tra di loro dipendenti.

Probabile: è un evento che dipende dal verificarsi da una o più manifestazioni sfavorevoli (o dannose), che devono avvenire contemporaneamente, e che sono dipendenti tra di loro in quanto l'evento si è già verificato in passato.

L'aspetto che è stato considerato in maniera completamente diversa rispetto all'approccio tradizionale è quello relativo alla probabilità, che nelle analisi di sicurezza ed affidabilità tradizionali riveste un ruolo essenziale per decidere se prendere o meno in considerazione interventi migliorativi dell'area oggetto d'esame. Nell'approccio qui seguito la probabilità ha assunto un ruolo secondario, poiché si è ritenuto che gli eventi qui considerati, a prescindere dalla loro probabilità di accadimento, hanno la possibilità di causare un danno grave alle persone e ai beni contenuti all'interno dell'edificio analizzato. Ciononostante, si è voluto ricercare all'interno alla letteratura

internazionale specialistica di settore, un possibile rateo di frequenza e di probabilità di accadimento di un evento accidentale quale l'incendio (individuato come dato variabile tra $3,5 \times 10^{-5}$ e $4,3 \times 10^{-3}$ a seconda degli impianti per la lotta all'incendio e a seconda delle procedure previste all'interno della struttura analizzata) [6, 11, 12].

MISURE ANTINCENDIO ESISTENTI

All'interno del padiglione aeronavale sono presenti diversi dispositivi di protezione antincendio di tipo manuale. Nello specifico, sono presenti dei presidi elementari (estintori non carrellati e una rete di idranti interni a muro UNI 45) posizionati sul perimetro del reparto in esame. Gli impianti di rivelazione incendio e segnalazione allarme incendi (IRAI) all'interno del padiglione in esame sono di tipo puntuale posizionato a soffitto. In aggiunta alla rivelazione puntuale, è stato realizzato in anni più recenti, un sistema di rivelazione di tipo lineare (beam detectors), posizionato al di sopra dei reperti in esposizione al piano +8.00 e ripartito su tre sottosistemi, uno per ogni campata presente in copertura.

L'impianto di allarme è completato da diversi pulsanti manuali al piano ed è presente un impianto di diffusione sonora dell'allarme. Tutti gli allarmi vengono riportati in una centralina posizionata in una posizione remota. All'interno del padiglione non vi sono impianti di controllo o soppressione d'incendio ad acqua, tipo sprinkler, né sistemi di estrazione di fumo e calore.

Durante le ore di attività del museo è prevista la presenza di una squadra di addetti antincendio destinata alla lotta incendi. Durante le ore notturne e di chiusura per festività, la sede rimane controllata da agenti di una società di vigilanza esterna che possono intervenire solo in caso di allarme.

VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Il padiglione aeronavale fin qui analizzato può essere classificato come un'area sostanzialmente ad alto rischio d'incendio elevato dovuta principalmente alle conseguenze che l'evento potrebbe avere, pur nella ridotta probabilità di accadimento, legate soprattutto alla peculiarità dell'edificio, dei reperti esposti e della loro composizione materiale, nella strutturale inapplicabilità di separazioni antincendio significative all'interno delle aree di esposizione ed alla mancanza di misure di protezione attiva automatiche all'interno delle medesime aree. Nello specifico, il brigantino analizzato, se coinvolto in un incendio, potrebbe coinvolgere ulteriori aree espositive in tutta la loro estensione. In queste particolari condizioni, le probabilità di accadimento dei diversi scenari analizzati, risultano avere un ruolo secondario ed un impatto minimo, (comunque ipotizzabili ad un rateo di $4,3 \times 10^{-3}$ inteso come frequenza d'incendio all'interno di una struttura museale secondo la letteratura internazionale) rispetto alle conseguenze di un incendio. Infatti, in caso d'incendio, che si estenda anche solo al singolo reparto, comporterebbe, oltre ad un danno materiale notevole, una perdita di tipo culturale e storica di elevato valore, ritenuto non accettabile per l'attività in esame. Inoltre, le conseguenze di un incendio non prontamente controllato, comporterebbero un arresto dell'attività museale andando ad interdire l'accesso al padiglione ad un pubblico pagante per un esteso arco temporale.

INTERVENTI ANTINCENDIO D'ADEGUAMENTO PER RIDUZIONE DEL RISCHIO

A valle della valutazione del rischio di incendio, si è successivamente passati alla disamina dei possibili interventi di miglioramento per il controllo del rischio

residuo. Tra questi risultano di fondamentale importanza l'ampliamento e potenziamento del sistema di rivelazione incendi e l'installazione di un sistema di controllo dell'incendio.

Il miglioramento del sistema di allarme incendio è stato ipotizzato mediante l'installazione di un impianto di rivelazione dei fumi di tipo "ad aspirazione" esteso all'intero reparto.

Un sistema di rivelazione di fumo ad aspirazione e campionamento (ASD) è in grado di rilevare la presenza di prodotti della combustione fin dai primi secondi dall'innescio del materiale combustibile, grazie ad un'aspirazione attraverso una tubazione, opportunamente forata e generalmente di piccolo spessore, che aspira continuamente l'aria presente nell'ambiente per cercare eventuali tracce di fumo. La campionatura dell'aria viene filtrata per trattenere le particelle di polvere di maggiori dimensioni andando ad evitare falsi allarmi. All'interno del rivelatore i campioni di aria prelevata dell'ambiente sono esposti ad una sorgente di luce ad alta intensità e largo spettro (laser). La luce incidente deviata dalle particelle di fumo passa attraverso una serie di sistemi ottici fino ad un convertitore, che passa i segnali al sistema di controllo. Sulla base di appropriati e predefiniti livelli di presenza, il sistema genera segnali di allerta, di allarme e può essere eventualmente collegato a sistemi di spegnimento automatico.

Per ridurre gli effetti dannosi di un eventuale incendio posto nella sottocoperta dell'oggetto in esame, un'ulteriore soluzione di miglioramento per il controllo del rischio residuo, è l'installazione di un sistema di soppressione d'incendio tipo Water Mist. L'azione di un sistema tipo Water-Mist si basa su diversi principi come un elevato

raffreddamento e lo spostamento dell'ossigeno causato dalla formazione locale di vapore acqueo, portando appunto al raffreddamento delle fiamme e ad una diluizione dei vapori infiammabili causata dal vapore acqueo. Allo stesso tempo, l'azione di un sistema di soppressione tipo Water Mist porta all'attenuazione del calore radiante generato dall'incendio e al bagnamento del combustibile presente nei dintorni del focolaio.

L'impianto water mist che si è selezionato in questo caso basa il suo funzionamento sulla tecnologia tipica degli sprinkler; come i sistemi tipo sprinkler le testine water mist sono automatiche con elemento termosensibile, posizionate in prossimità del soffitto delle aree da proteggere, ed intervengono solo a causa della temperatura raggiunta. Il funzionamento di questa tipologia di sistema si basa però su una domanda idrica nettamente inferiore rispetto ad un "classico" sistema sprinkler [13], con un diametro dei tubi ridotti e quindi complessivamente un "peso" minore e meno invadente sulla struttura da proteggere.

L'installazione di un sistema di controllo d'incendio "classico" tipo sprinkler o anche di tipo water mist nelle aree adiacenti all'oggetto in esame, è ritenuta inoltre fondamentale per ridurre le probabilità che un eventuale incendio divampato in prossimità del brigantino raggiunga temperature tali da innescare una propagazione di fiamme sullo scafo. Come riportato all'interno del Codice di prevenzione incendi di recente pubblicazione in Italia (D.M. 18 Ottobre 2019), nel caso in cui l'attività preveda sistemi di controllo dell'incendio di tipo automatico (es. impianto sprinkler o water mist), è possibile ipotizzare che l'andamento della potenza termica rilasciata $HRR(t)$ non raggiunga il valore massimo HRR_{max} che si sarebbe potuta raggiungere in condizioni favorevoli per la

combustione, ma possa invece essere ridotta ad un valore inferiore raggiungibile all'istante t_x ovvero al tempo di entrata in funzione dell'impianto automatico. Tale valore permane per un intervallo di tempo pari alla durata di alimentazione prevista per l'impianto, entro cui si presume che l'incendio sia controllato o venga definitivamente estinto mediante l'intervento manuale delle squadre di soccorso. Grazie all'intervento di un sistema di protezione attiva antincendio, tipo sprinkler o water mist, si limiteranno le temperature generate dall'incendio evitando dunque l'eventuale propagazione di fiamme sul reperto oggetto di studio.

CONCLUSIONI

Il caso studio qui presentato ha utilizzato le logiche e le impostazioni del risk assessment per individuare e analizzare le possibili configurazioni di rischio d'incendio che si possono verificare in prossimità di un imponente brigantino, realizzato completamente in legno e conservato all'interno di un padiglione espositivo-museale aeronavale visitato da migliaia di visitatori l'anno, andando a valutare, in maniera qualitativa, la probabilità di accadimento e le possibili conseguenze. L'analisi è stata eseguita partendo dall'identificazione dei possibili pericoli d'incendio passando poi alla descrizione e valutazione delle misure di controllo esistenti, sia di carattere passivo che attivo. Dalle valutazioni elencate in precedenza, è emerso che, in caso d'incendio che sfugga al controllo dei mezzi di primo intervento, la salvezza del reperto e delle altre aree espositive dell'immobile potrebbero essere conseguite solamente affidandole a sistemi di protezione automatici, non potendo contare su un certo ed efficace intervento dall'interno con mezzi manuali.

Questo fa assumere alla protezione attiva, da realizzare con impianti di particolare affidabilità e capacità, e alla protezione passiva un'importanza ancora maggiore. Pertanto, adottare un'adeguata strategia antincendio costituita da una combinazione di sistemi di protezione attiva e passiva, realizzati secondo regola d'arte, e implementando una corretta manutenzione degli stessi, risulta essere un fattore chiave per ridurre il rischio d'incendio, evitando o minimizzando così eventuali danni su reperti di importante rilevanza storica culturale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] 'Storia Della Nave Scuola Ebe - Museoscienza'. Accessed 10 October 2019. http://www.museoscienza.org/approfondimenti/documenti/nave_scuola_ebe/.
- [2] Museo Nazionale Scienza e Tecnologia Leonardo Da Vinci. 'La Musealizzazione e La Conservazione Della Ebe'. Museo Nazionale Scienza e Tecnologia Leonardo da Vinci, 2019. http://www.museoscienza.org/approfondimenti/documenti/conservazione_ebe/.
- [3] Museo Della Scienza e Della Tecnologia - Padiglione Trasporti Aerei e Marittimi, Via Olona, 6 Bis - Milano (MI) – Architetture – Lombardia Beni Culturali'. Accessed 10 October 2019. <http://www.lombardiabeniculturali.it/architetture/schede/MI060-00010/>.
- [4] Dietsch, Mark A., and Robert H. White. 'Fire Safety of Wood Construction'. *Wood Handbook* 18, no. FPL-GTR-190 (12 December 2016): 1–22.
- [5] Babrauskas, V. 'Ignition of Wood: A Review of the State of the Art'. *Journal of Fire Protection Engineering* 12, no. 3 (1 August 2002): 163–89. <https://doi.org/10.1177/10423910260620482>.
- [6] Incident Data - Risks | Boat Safety Scheme | Go Boating - Stay Safe'. Accessed 14 October 2019. <https://www.boatsafetyscheme.org/about-us/governing-the-bss/incident-data-risks/>.
- [7] Hurley, Morgan J., Daniel Gottuk, John R. Hall, Kazunori Harada, Erica Kuligowski, Milosh Puchovsky, José Torero, John M. Watts, and Christopher Wieczorek, eds. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York, NY: Springer New York, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>.
- [8] Blaze Ravages Historic Cutty Sark'. *BBC News*, 21 May 2007. <http://news.bbc.co.uk/1/hi/england/london/6675381.stm>.
- [9] Karlsson, Björn, and James G. Quintiere. *Enclosure Fire Dynamics*. Environmental and Energy Engineering Series. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.
- [10] Tihay, Perez-Ramirez, Morandini, Santoni, and Barboni. 'Heat Transfers and Energy Released in the Combustion of Fine Vegetation Fuel Beds'. Bardeaux, 2013.
- [11] Tétreault, Jean. 'Fire Risk Assessment for Collections in Museums', May 2008.
- [12] National Fire Protection Association, National Fire Protection Association, and Technical Committee on Cultural Resources. *NFPA 909: Code for the Protection of Cultural Resource Properties--Museums, Libraries, and Places of Worship*, 2017.
- [13] Kopp and Bindreiter. 'IWMA: A Guide to Water Mist Systems'. *International Fire and Safety Journal*, no. 03–21 (2021): 22–24.

RISK ANALYSIS AIMED AT THE PROTECTION OF CULTURAL HERITAGE - CASE STUDY

AUTHOR: Giovanni Cosma, Senior Fire Engineer and Team Coordinator - Jensen Hughes Italy

BIO

Graduated at the International Master Degree in Fire Safety Engineering (IMFSE) held by three major European universities in the field of fire protection engineering, he quickly developed a real passion for this branch of engineering. He has gained international experience in the field of design of fire prevention systems and fire strategies with a performance-based approach. Immediately after his studies, he began his working experience, always in an international context, as a fire consultant for a British company specialized in smoke and heat extraction systems. Upon returning to Italy in more recent years, he continued to work as a fire safety consultant focusing on smoke and heat ventilation systems design, on fluid dynamics analysis (CFD) fire-fighting systems designs developed with performance-based methods.

ABSTRACT

Through the techniques of fire risk assessment, it is possible to set up a bespoke analysis for any type of building, taking into account its content, occupants and fire control systems, with the intention of determining the frequency and possible consequences of certain fire scenarios and thus allowing fire engineers to assess the possible need to identify compensatory measures to reduce any unacceptable risk.

The following case study uses the logic and settings of the risk assessment to identify and analyse the possible risk configurations that can occur in the vicinity of an imposing wooden exhibit preserved in the aeronaval exhibition pavilion at the National Museum of

Science Leonardo da Vinci, in Milan. The case study assesses, in a qualitative way, the probability of occurrence and the possible consequences. The analysis was performed starting from (a) the identification of the possible fire hazards that may affect the exhibit under examination, (b) the description and evaluation of the existing passive and active control measures, and evaluate them if sufficient to minimize the risk of a fire inside the aeronaval pavilion, (c) the description of the procedures in place in terms of (i) emergency planning, (ii) checks and maintenance and (iii) training and information of employees, (d) the identification of possible improvement for the control of residual risk and the related implementation program.

As part of the analysis, particular attention was then given to the technical assessment of the adequacy of the existing fire-fighting systems, analysing them essentially from a documentary point of view and above all from a performance point of view, in order to evaluate their consistency in relation to the reference standards adopted.

INTRODUCTION

Fire risk assessment is defined as a process through which risk levels, actions and compensation measures are determined to minimize the specific fire risk for a given activity, a building or a simple process. The risk analysis can be conducted using two different methodologies: a qualitative or a quantitative analysis. The first method uses a relative or descriptive scale to measure the probability of occurrence and the consequences deriving from a given risk, while the latter uses a numerical scale that allows to quantify the identified risks in more detail, obtaining results that can be classified according to the preselected acceptability thresholds. Generally, the fire risk is defined,

in a simple and accessible way, i.e. as the product between the probability of occurrence and the consequences of the event. The purpose of the present study is to evaluate the different configurations of fire risk, and the probable consequences of its development, which can occur in the vicinity of an important museum exhibit, a brig-schooner, also known as Brigantino EBE, completely made of wood and built in the first half of 1900. The exhibit is kept inside the aeronaval pavilion of the

at identifying the various risks and their analysis.

Among the risks to which the brig is exposed, fire is perhaps the most relevant given its wooden nature. Additionally, the particularly "open-space" environment of the building containing the artefact would allow it to burn in a rather rapid and violent manner.

Thanks to the techniques of risk analysis and definition of fire scenarios, it was possible to

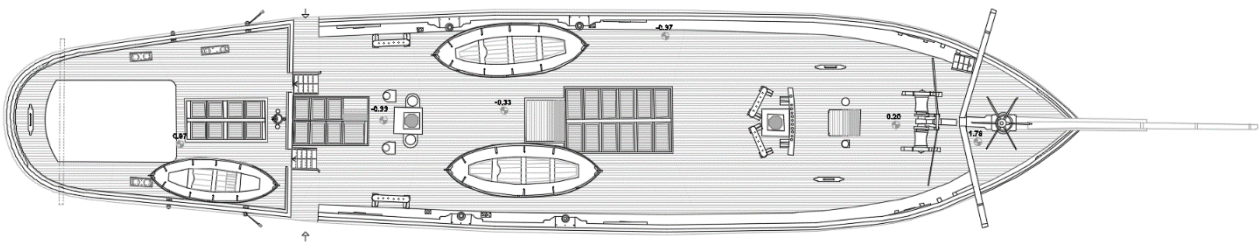


Figure 1 – Brig Plan view

National Museum of Science and Technology Leonardo da Vinci, in Milan, where other installations and artifacts of the highest quality and value are exhibited.

ANALYSIS

The analysis was performed with reference to UNI ISO16732 - Fire Risk Assessment by adopting the qualitative risk assessment approach. This document is used by fire safety professionals to mathematically represent the uncertainty and assess the risk in the fire safety field. The present document provides a general conceptual basis and illustrates the principles of risk analysis applicable to all phenomena and all fire configurations within a given environment. According to this international document, risk assessment is mainly made up of two phases: the first phase is aimed at defining a context, including the fire safety objectives to be met and the relative assumptions associated with the context itself; the second phase, on the other hand, is aimed

define design solutions for the safeguard of a valuable artefact exhibited inside the museum, which is visited by a large number of people every year who can walk next to it and eventually touch it. The object of the analysis is to evaluate the possible incident scenarios that may occur in the vicinity of the exhibit, assessing the risks in terms of probability and consequences. The analysis examines events such as arson scenarios, fire scenarios based on the statistics of similar events occurred in environments with a similar use, and fire scenarios arising from maintenance or renovation works.

The ship, renamed "EBE", has a 40,3 m long hull (50,5 m inclusive of the figurehead) and is 8,4m wide [1]. The brig is entirely built in pitch pine, oak, and spruce. In the last few years the ship has been through several processes of lightening, from the removal of the sails, to the removal of any internal equipment, lighting and cabling, to minimize the structural load of the ship [2]. The brig is equipped with a relative

new smoke detection system installed in the below deck area.

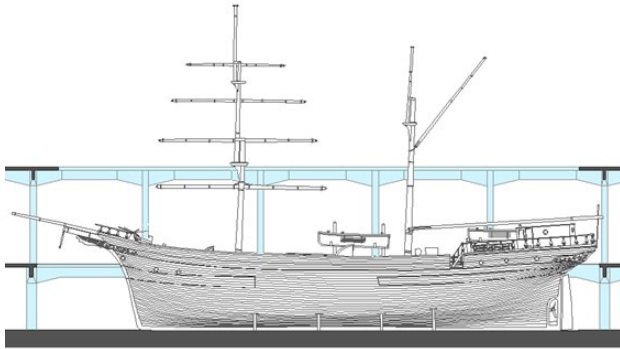


Figure 2 - Brig Longitudinal Profile

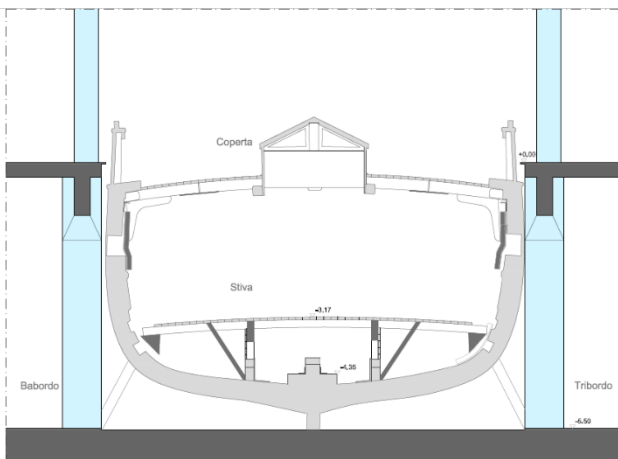


Figure 2 - Cross Section of the Brig

The Brig is centrally located within the pavilion and it's exhibited among other unique and historical artifacts, all of combustible nature.

The aeronautical pavilion of the National Museum of Science and Technology Leonardo da Vinci, where the Brig is housed, is characterized by horizontal and vertical concrete bearing structures, built in the first half of the 1960s, with a rather articulated roof shape. The building is about 30 m high.

The building is characterized by supporting pillars in reinforced concrete and brick walls. The fire separations inside the pavilion are not substantial. The building is spread over four floors, two of which are above ground and two

are underground. All the floors are accessible to the public, i.e. floor at -5.50m, +0.00 m and +8.00m are interconnected, creating a single fire compartment. The Brig is perfectly inserted between two rows of columns that keep it in a correct vertical position with the help of metal trestles placed to support the hull [3].

Other installations of a similar nature and combustibility behaviour are placed around the brig with approx. 2-3 m from it. The only exception is floor -5.50m, on the port side of the brig, where other exhibits are installed at a closer range and this area of the museum is reserved for extra activities open to the public such as workshops and events.

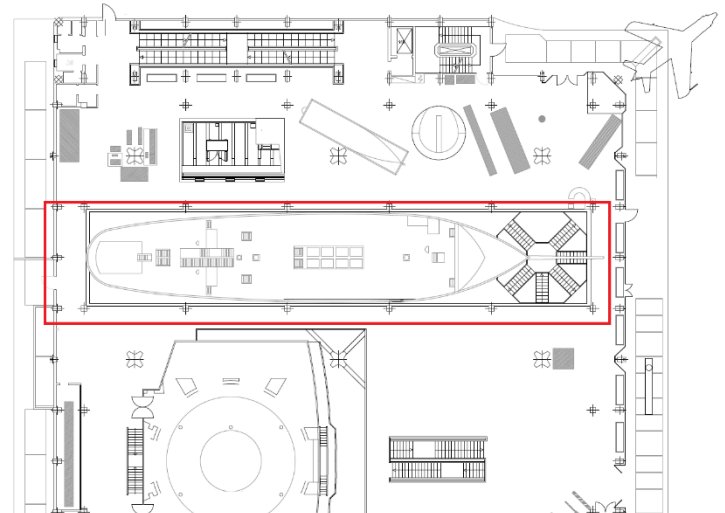


Figure 3 - Brig position within the pavilion +0.00m

ANALYSIS OF THE MATERIALS

When wooden elements are exposed to fire, a carbonization process is triggered in which the cross section of the element itself starts to reduce while forming a charred layer. In addition to this carbonization process, the structural capacity of the wooden element is affected by the high temperature gradient forming on the surface not directly exposed to the fire [4]. Therefore, the fire resistance

characteristics of the wooden elements exposed to fire are conditioned by various factors such as the insulating effects of the carbonized layer, the density and moisture content of the material, and by the high temperature gradient that is formed under the base of the charcoal layer. Establishing the speed of the carbonization process is of fundamental importance to determine the fire resistance of the various structural elements, since the carbonized layer has no load-bearing capacity. The most effective methods to improve fire safety for wooden structures are preventive actions that reduce the possibility of ignition [4].

At temperatures above 100°C -150°C, the strength of the wooden elements begins to decrease. This phenomenon and reaction of depolymerization depends on the moisture content, the heating medium, the exposure period and the type of wood analyzed. Several international studies [5] have shown that the chemical bonds present in wooden materials begin to break at temperatures just over 100°C. Between 100 °C and 200 °C, wood dehydrates and generates water vapor and other non-combustible gases including CO₂, formic acid, acetic acid and H₂O. With prolonged exposure to higher temperatures, wood begins the carbonization process. Between 200 °C and 300°C, some wood components begin to undergo a significant pyrolysis process, with an important production of CO released within the surrounding space.

FIRE SCENARIOS

From the statistics available in recent years literature [6], it has been possible to identify a set of fire scenarios according to the possible main causes of ignition that may involve naval boats. In relation to all reasonably foreseeable

operating conditions for the analysed object, the following Initiating Events (I.E) have been identified. This set of I.E. ("fire starts...") was also developed by taking into account fires that have historically involved similar artefacts to the one being analysed:

- E.I.1 Principle of fire triggered by electrical equipment or lighting devices, both mobile (temporary) and fixed installation;
- E.I.2 Principle of fire triggered by cigarette or similar source of ignition;
- E.I.3 Principle of fire derived from arson;

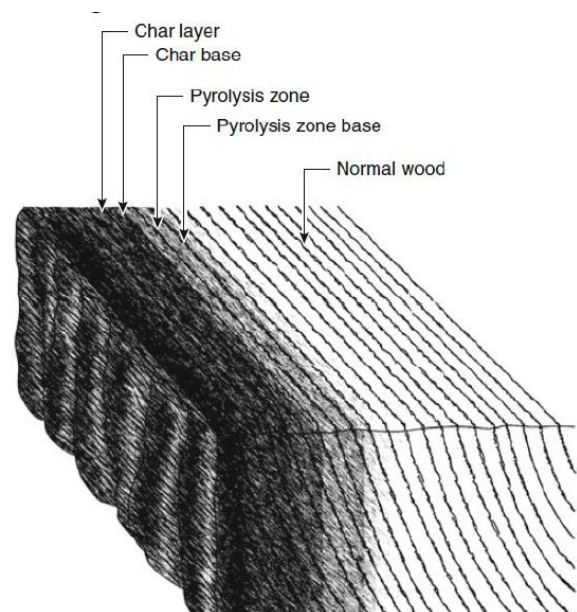


Figure 4 - Carbonation process of wood materials

For each of the initiating events, possible subsequent events ("fire spread towards ...") were then identified. Lastly, conclusive events and the consequent event trees (E.T.) were identified ("The fire involved..."). The event tree resulting from the initiating events indicated in the previous paragraph can be summarized and grouped as follows (scenario clusters):

- E.T.1 - Fire located below deck (inside) of the Brig

- E.T.2 - Fire located on the upper deck of the Brig
- E.T.3 - Fire positioned at an altitude of +0.00 near the hull of the Brig
- E.T.4 - Fire originated at an altitude of -5.50 meters near the hull of the Brig

POSSIBLE CONSEQUENCES

In the event of an ignition of combustible material inside the analysed exhibit (E.T.1), whether of an electrical nature, or whether it is an ignition caused by arson activity, the fire would spread within few minutes to various wooden elements, such as columns and other structural elements present inside the Brig. The flame propagation capacity on wooden materials can vary according to various factors such as the orientation of the combustible material, the direction of the flow of burnt gases and the humidity content present within the wooden material. In the event of a fire inside the hull, given the small volumes of the lower deck, the combustion process would also be affected by the heat blocking capacity and thermal feedback of the hull and the ceiling (mainly composed of oak and pine) [4], which would lead to a more rapid increase in temperatures, and therefore to an increase in thermal radiation, even on those surfaces not directly exposed to open flames. This would result in a condition of facilitated flame propagation, with the critical heat flux for a further propagation being reduced, up to reach flashover conditions within 7-10 minutes and a possible loss of the entire exhibit. The thermal release power required to reach flashover conditions was calculated with the McCaffrey, Quintiere and Harkleroad method [7]:

$$Q_{FO} = 610(h_k A_T A_0 \sqrt{H_0})^{0.5}$$

Where h_k is the effective conductive heat transfer coefficient of the analysed volume (kW/m²K), A_T is the total area of the

environment that allows the heat exchange (m²), A_0 and H_0 are the total weighted area and height of all openings inside the analysed environment (m).

In the case of a fire on the Brig's jetty (E.T.2), the fire would spread more slowly as there would be a greater heat loss than in the previous fire hypothesis. However, the development of the fire would lead to a plausible spread of flames towards the masts and towards the fenders of the brig, all of wooden nature. An historical case of a similar boat to the one being analysed is here presented and taken as reference: the Cutty Stark, an English clipper with a tonnage of 963 tons, a length of 64.6 m and a width of 10.94 m, exhibited at the Maritime Greenwich World Heritage, London [8]. In May 2007, the historic sailing ship was seriously damaged by a fire during a hull restoration work. According to the reconstruction of the events by the investigators, the motor of a forgotten vacuum cleaner, left on for two consecutive days by the restoration workers, caused the development of the flames. The upper deck was completely lost as well as most of the lower ones. Furthermore, at the time of the accident the fire alarm did not go off and it was not possible to use the fire extinguishers, which had been temporarily removed by the workers. The lack of alarm has also delayed the intervention by the firefighters which led to an amplification of the overall damage caused by the event.

It has been therefore assumed that even a fire that breaks out on the deck, or near the castle or near the keep, would lead to extensive damage to the Brig with a substantial spread of the fire.

In the event of a fire caused by combustible material positioned near the perimeter of the exhibit at an altitude of +0.00 (E.T.3), since

there are further exhibits of a combustible nature at a distance of about 2.1 m from the hull, the Brig could be directly exposed to flames and be involved into a fire. In order to analyse this possibility, it has been decided to calculate the minimum heat output necessary to trigger a fire on the brig itself according to Modak's simplified method [9].

$$\dot{q}_{crit}'' = \frac{\chi_r \dot{Q}}{4\pi R_0^2}$$

Where (q''_{crit}) is the critical thermal radiation, assumed to be 10 kW/m², typical for wooden materials [7] and χ_r is the fraction of energy released by the fire as thermal radiation (calculated as 30%) [10]. Considering a distance (R_0) the separation between the hull of the brig and the other combustibles equal to 2.1 m, the resulting thermal power to spread the fire towards the rig itself resulted in 1,650 kW. This value is considered easily reachable from the objects displayed around the brig as they are made of wooden materials such as birch, fir, and plywood, which with a thickness of about 10 mm, variable density between 530 and 600 kg/m³ with a humidity rate of about 10%, which would generate enough energy and heat sufficient to ignite a fire on the brig by radiation.

In a similar way to what was previously described, in the event of a fire which involves artifacts exhibited on the lower floor (-5.50m) and positioned near the hull, given the "favourable" position of the fire, and given the buoyant nature of heat, the critical temperatures for self-ignition (or temperature sufficient for structural weakening) of the wooden materials would be reached within a few minutes. Using Zuckosky's model [9] regarding the smoke plume, it was possible to calculate the trend of temperatures at different heights of the brig's hull. By assuming a vertical separation between the fire base and the hull of $z = 2.2-4.3$ m, and placing a thermal

release power Q equal to 1150 kW, which is considered as the average of different HRR curves of various full-scale tests carried out on wooden, plastic and metal chairs, the resulting temperatures were identified between 152 °C-420 °C.

PROBABILITIES

The evaluation of the consequences mentioned above is followed by the evaluation of the probability of occurrence of the identified accidents. In this case study, some reference levels were established and categorized onto three levels:

Unlikely: it is an event that depends on the occurrence of numerous and different unfavourable (or harmful) sub-events, which must occur simultaneously, and which are basically independent of each other.

Less likely: it is an event that depends on the occurrence of numerous unfavourable (or detrimental) sub-events, which must occur simultaneously, and which are dependent on each other.

Likely: it is an event that depends on the occurrence of one or more unfavourable (or detrimental) sub-events, which must occur simultaneously, and which are dependent on each other as the event has already occurred in the past.

The aspect that has been considered in a completely different way compared to the traditional approach within the presented case study, is the one related to the probability, which in traditional safety and reliability analysis plays an essential role in deciding whether or not to consider improving interventions in the area under examination. In this case study, probability has assumed a secondary role, since it has been considered

that the events considered, regardless of their probability of occurrence, would have the possibility of causing serious damage to the occupants and to the goods contained within the building analysed. Nonetheless, the study has defined, by looking within the specialized international literature, a possible rate of frequency and probability of occurrence of an accidental event (such as fire) to be between 3.5×10^{-5} and 4.3×10^{-3} . The range of such probabilities depends on the availability of the fire-fighting systems and the safety & emergency procedures adopted within the analysed structure) [6, 11, 12].

EXISTING FIRE SAFETY MEASURES

Within the air-naval pavilion there are various manual fire protection devices, which are considered primary aids to fight fires. Such measures consist of non-wheeled fire extinguishers and a network of internal wall hydrants, which are positioned on the perimeter of the exhibit being analysed. The fire detection and fire alarm systems inside the pavilion consist of photoelectric smoke detectors positioned on the ceiling. In addition to the detection, a linear detection system (beam detectors) has been installed in more recent years, positioned above the exhibits located at +8.00m floor and divided into three subsystems, one for each span present in roof.

The fire alarm system is characterized by several manual alarm buttons on each floor and sound beacons equally distributed within the volume. All alarms are reported to a control room located in a remote location. Inside the pavilion there are no water-based fire control or suppression systems, such as sprinklers, or smoke and heat extraction systems.

During working hours, a team of internal first responders is allocated to fight fires and it is

expected to be present. During night hours or during closure times (i.e. holidays), the control room remains remotely monitored by an external security company who can only intervene in the event of an alarm.

RISK EVALUATION

The air-naval pavilion, here analysed, can be classified as an area substantially at high risk of fire due to the consequences that such event could have, despite the reduced its probability of occurrence to the building and its exhibits. The evaluation takes into account the artefacts material composition, the structural inapplicability of dividing the exhibition areas with fire separations (i.e. fire compartments) and in the lack of automatic active protection measures within the same areas.

Specifically, the analysed brig, if involved in a fire, could involve further exhibition areas in all their extension. In these particular conditions, the probability of occurrence of the various scenarios analysed appear to have a secondary role and a minimal impact, with respect to the consequences of a fire. However, a rate of 4.3×10^{-3} has been selected as the frequency of fire within a museum structure based on international literature. In the event of a fire, which extends even to only one single artefact, it would entail, in addition to significant material damage, a cultural and historical loss of high value, deemed unacceptable for the museum's activities. In addition, the consequences of a fire that is not promptly controlled would result in a shutdown of museum activities, prohibiting the access to the public for an extended period of time leading to an economical loss for the museum.

ADDITIONAL FIRE SAFETY MEASURE TO REDUCE THE RISK

Following the fire risk assessment, the present case study carried out the examination of the

possible improvements to control the residual risk. Among these enhancements, fire detection and fire control system are considered of fundamental importance.

The improvement of the fire alarm system was indicated through the installation of an aspirating smoke detection system extended to the entire department. An aspiration and sampling smoke detection system (ASD) is able to detect the presence of combustion products from the first seconds after the ignition of the combustible material. The suction of such particles occurs through a suitably perforated pipe, which continuously samples the air present in the environment to look for any traces of smoke. The sampled air is filtered to retain the larger dust particles, thus avoiding false alarms. Inside the detector, the air samples taken from the environment are exposed to a high intensity and wide spectrum light source (laser). The incident light deflected by the smoke particles is then passed through a series of optical systems to a converter, which passes the signals to the control system.

To reduce the detrimental effects of a possible fire placed in the lower deck of the Brig, a further improvement solution for controlling residual risk is the installation of a Water Mist type fire suppression system. The action of a Water-Mist system is based on several principles such as high cooling and the displacement of oxygen caused by the local formation of water vapor, leading to the cooling of the flames and a dilution of flammable vapours. At the same time, the action of a Water Mist suppression system leads to the attenuation of the radiant heat generated by the fire and to the wetting of the additional combustible materials present in the vicinity of the outbreak of the fire.

The water mist system selected in this case bases its operation on the typical sprinkler technology; like sprinkler-type systems, the water mist heads open automatically thanks to thermosensitive elements, positioned within the head itself and positioned near the ceiling of the areas to be protected. Thus, the system intervenes only when sufficiently hot temperatures are reached to break such thermosensitive elements. However, the operation of this type of system is based on a much lower water demand compared to a "classic" sprinkler system [13], requiring smaller pipe diameters, thus lowering the weights to be supported.

The installation of a "classic" sprinkler system (or water mist system) to the adjacent area of the analysed Brig, is considered to be essential improvement to reduce the probability that a possible fire in the vicinity of the brig will reach temperatures such to trigger a further spread of flames onto the brig's hull.

As reported in the recently published Fire Prevention Code in Italy (Ministerial Decree 18 October 2019), in the event that the building includes automatic fire control systems (e.g. sprinkler or water mist systems), it is possible to assume that the trend of the heat release rate of the fire (HRR) does not reach the maximum value (HRR_{max}) that could have been reached without such systems in place. Instead, the HRR can be reduced to a lower value and capped off at the instant t_x which is considered the time of activation of the automatic sprinkler system. The HRR curve can remain constant for the time equal to the expected power and water supply duration of the system, within which it is assumed that the fire will be controlled or definitively extinguished by the manual intervention of the rescue teams. Thanks to the activation and installation of an active fire protection system,

such as sprinkler or water mist, the temperatures generated by the fire can be considered limited, thus avoiding the possible spread of flames on the analysed artefact.

CONCLUSIONS

The present case study used the logic and settings of the classical risk assessment to identify and analyse the possible configurations of fire risk that can occur in the vicinity of an imposing brig, made entirely of wood and kept inside an aeronaval museum which is visited by thousands of visitors a year. The study assessed, in a qualitative way, the probability of occurrence and the possible consequences of a fire affecting the Brig. The analysis was performed starting from the identification of possible fire hazards, then moving on to the description and evaluation of the existing fire safety measures, both passive and active. From the assessments listed above, it emerged that, in the event of a fire that escapes the control of the first fire-fighting intervention, the conservation of the exhibit and of the other exhibition areas around the building could be achieved only by implementing automatic protection systems, as it would not be possible to rely on certain and effective intervention from manual means.

Therefore, adopting an adequate fire-fighting strategy consisting of a combination of active and passive protection systems and implementing proper maintenance routines of such components, is a key factor in reducing the risk of fire, minimizing or avoiding any damage on artefact of historical and cultural importance.

REFERENCES

- [1] 'Storia Della Nave Scuola Ebe - Museoscienza'. Accessed 10 October 2019. http://www.museoscienza.org/approfondimenti/documenti/nave_scuola_ebe/.
- [2] Museo Nazionale Scienza e Tecnologia Leonardo Da Vinci. 'La Musealizzazione e La Conservazione Della Ebe'. Museo Nazionale Scienza e Tecnologia Leonardo da Vinci, 2019. http://www.museoscienza.org/approfondimenti/documenti/conservazione_ebe/.
- [3] Museo Della Scienza e Della Tecnologia - Padiglione Trasporti Aerei e Marittimi, Via Olona, 6 Bis - Milano (MI) – Architetture – Lombardia Beni Culturali'. Accessed 10 October 2019. <http://www.lombardiabeniculturali.it/architetture/schede/MI060-00010/>.
- [4] Dietenberge, Mark A., and Robert H. White. 'Fire Safety of Wood Construction'. *Wood Handbook* 18, no. FPL-GTR-190 (12 December 2016): 1–22.
- [5] Babrauskas, V. 'Ignition of Wood: A Review of the State of the Art'. *Journal of Fire Protection Engineering* 12, no. 3 (1 August 2002): 163–89. <https://doi.org/10.1177/10423910260620482>.
- [6] Incident Data - Risks | Boat Safety Scheme | Go Boating - Stay Safe'. Accessed 14 October 2019. <https://www.boatsafetyscheme.org/about-us/governing-the-bss/incident-data-risks/>.
- [7] Hurley, Morgan J., Daniel Gottuk, John R. Hall, Kazunori Harada, Erica Kuligowski, Milosh Puchovsky, José Torero, John M. Watts, and Christopher Wieczorek, eds. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York, NY: Springer New York, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>.
- [8] Blaze Ravages Historic Cutty Sark'. *BBC News*, 21 May 2007. <http://news.bbc.co.uk/1/hi/england/london/6675381.stm>.
- [9] Karlsson, Björn, and James G. Quintiere. *Enclosure Fire Dynamics*. Environmental and Energy Engineering Series. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.
- [10] Tihay, Perez-Ramirez, Morandini, Santoni, and Barboni. 'Heat Transfers and Energy Released in the Combustion of Fine Vegetation Fuel Beds'. Bardeaux, 2013.
- [11] Tétreault, Jean. 'Fire Risk Assessment for Collections in Museums', May 2008.
- [12] National Fire Protection Association, National Fire Protection Association, and Technical Committee on Cultural Resources. *NFPA 909: Code for the Protection of Cultural Resource Properties--Museums, Libraries, and Places of Worship.*, 2017.
- [13] Kopp and Bindreiter. 'IWMA: A Guide to Water Mist Systems'. *International Fire and Safety Journal*, no. 03–21 (2021): 22–24.

2 Ingegneria della sicurezza antincendio: la scelta del modello di calcolo
Fire safety engineering: choosing the calculation model

INGEGNERIA DELLA SICUREZZA

ANTINCENDIO: LA SCELTA DEL MODELLO DI CALCOLO

AUTORE: Lorenzo Contini.

Laureato in Ingegneria dei Sistemi Edilizi presso il Politecnico di Milano, si occupa di sicurezza antincendio di interventi complessi. È specializzato nella progettazione con approccio prestazionale, grazie alla preparazione tecnica maturata durante il corso di laurea internazionale in Fire Safety Engineering (IMFSE) e all'esperienza acquisita in anni di collaborazione con studi professionali per la consulenza integrata di prevenzione incendi. In particolare, è esperto in analisi con metodi semplificati ed avanzati della dinamica dell'incendio, dell'evacuazione degli occupanti e dell'interazione tra i due sistemi. Partecipa a gruppi di lavoro ed è relatore in seminari in materia di sicurezza antincendio.

ABSTRACT

Nel panorama internazionale esistono attualmente numerosi modelli di calcolo per la progettazione antincendio prestazionale, sia finalizzati alla simulazione della dinamica dell'incendio, che alla simulazione dell'esodo degli occupanti. La scelta del modello più appropriato deve essere condotta per ogni progetto in base al campo di applicazione, alla complessità e alle caratteristiche dell'edificio, alle competenze del progettista, al livello di accuratezza con cui si vuole rappresentare la realtà. Nel seguito viene proposta una panoramica dei tipi di modello d'incendio utilizzabili per la progettazione prestazionale – analitici, a zone, di campo – e vengono illustrate le potenzialità e i limiti di ciascuno di essi.

INTRODUZIONE

L'evoluzione tecnologica e la trasformazione della società degli ultimi decenni hanno favorito la nascita e la proliferazione di nuove tipologie

architettoniche e soluzioni progettuali non convenzionali. Grande sviluppo verticale, volumi irregolari e complessi, elevato affollamento, materiali innovativi, sono solo alcuni dei nuovi elementi di rischio connessi alla propagazione dell'incendio, all'evacuazione delle persone, alla sicurezza strutturale.

Fortunatamente, in anni recenti, anche le discipline scientifiche che studiano i fenomeni connessi all'incendio e al comportamento umano in situazioni d'emergenza hanno fatto grandi passi avanti. Supportato dalla diffusione delle norme prestazionali, l'esperto antincendio dispone oggi di innumerevoli riferimenti e modelli di calcolo per la progettazione con approccio ingegneristico, da applicare a quelle situazioni peculiari non progettabili secondo le norme prescrittive.

Un modello di calcolo non è altro che una rappresentazione quantitativa di un fenomeno fisico e nasce con l'intento di rappresentare quanto più fedelmente il mondo reale. Nel campo dell'ingegneria della sicurezza antincendio, ad esempio, è possibile ricorrere a modelli al fine di predire lo sviluppo dell'incendio, il movimento degli occupanti o la risposta delle strutture alla sollecitazione termica. Con queste informazioni, è possibile progettare misure antincendio idonee ad assicurare il pronto intervento in caso d'incendio e contrastare le conseguenze avverse dell'evento incidentale. Nel campo della fire investigation, i modelli vengono anche impiegati per ricostruire un incendio già accaduto in modo da individuarne le cause.

Con la dicitura "modello di calcolo", tuttavia, ci si riferisce genericamente a una moltitudine di approcci più o meno sofisticati, che spaziano da semplici formule analitiche a complessi codici computerizzati. Pertanto, uno dei primi passi del processo di progettazione con metodo prestazionale consiste nella scelta del modello più idoneo allo scopo dell'analisi.

Verrebbe spontaneo immaginare che la progettazione con i metodi della Fire Safety Engineering (FSE) inizi con l'applicazione di

modelli più semplici e proceda per successive raffinzioni con l'applicazione di metodi di crescente complessità, laddove necessario. Tuttavia, questa progressione non sempre viene messa in pratica dai professionisti, che talvolta decidono di utilizzare i modelli più

alle competenze del progettista, al livello di accuratezza con cui si vuole rappresentare la realtà. Difatti, il professionista antincendio dispone di una moltitudine di strumenti nella propria cassetta degli attrezzi: sta a lui individuare quello più idoneo ed efficace per il

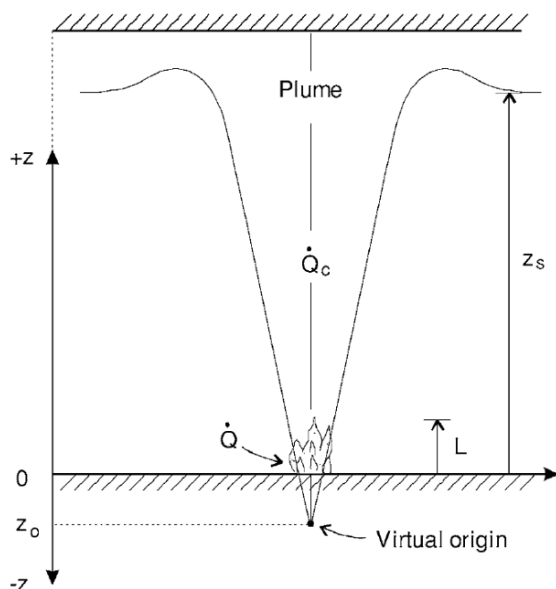


Figura 1 – Esempio di modello analitico: modello di Heskestad per il calcolo di raggio, temperatura e velocità del pennacchio d'incendio. Immagine tratta da [2]

$$b = 0.12 \left(\frac{T_0}{T_\infty} \right)^{1/2} (z - z_0)$$

$$\Delta T = 9.1 \left(\frac{T_\infty}{g c_p^2 \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3}$$

$$u_0 = 3.4 \left(\frac{g}{c_p T_\infty \rho_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{-1/3}$$

sofisticati come unico approccio alla progettazione. Tale evidenza potrebbe essere motivata dalla convinzione che i modelli sofisticati di fluidodinamica computazionale – anche chiamata “CFD” da Computational Fluid Dynamics – siano più accurati di altri metodi. In realtà, il loro utilizzo richiede grande competenza, tempo e risorse, e ciò non corrisponde necessariamente alla scelta ottimale per studiare casi “semplici”.

Oltretutto, l'impiego indiscriminato di modelli CFD rischia di condurre alla situazione paradossale in cui gli organi di controllo richiedono analisi elaborate per la soluzione di problemi semplici, a discapito dell'efficienza dei consulenti antincendio e della semplificazione dei procedimenti di prevenzione incendi.

Ogni modello di calcolo, invece, ha i propri punti di forza e i propri limiti e la scelta del metodo più appropriato deve essere condotta per ogni progetto in base al campo di applicazione, alla complessità e alle caratteristiche dell'edificio,

problema che si trova davanti.

I seguenti paragrafi propongono una rassegna dei modelli più frequentemente utilizzati nel panorama nazionale e internazionale per la progettazione antincendio prestazionale, finalizzati alla simulazione della dinamica dell'incendio. Saranno descritti tre tipi di modelli caratterizzati da complessità crescente – analitici, a zone, di campo – e verranno messi in luce potenzialità e limiti di ciascuno di essi, così da orientare il lettore verso una scelta consapevole.

MODELLI D'INCENDIO

Come è facile intuire, i modelli d'incendio sono finalizzati allo studio della dinamica dell'incendio e delle condizioni da esso prodotte all'interno di un compartimento. Alcune grandezze di interesse in un'analisi FSE sono tipicamente l'altezza dello strato di fumo e dello strato d'aria incontaminata, il tempo di

attivazione degli impianti di protezione attiva, il tempo di rottura dei vetri, la temperatura del fumo in prossimità degli elementi strutturali, l'irraggiamento termico su un bersaglio, la concentrazione di gas tossici, la visibilità nel fumo, il tempo di flashover e molti altri parametri.

MODELLI ANALITICI

I modelli di più pratici sono quelli analitici, ovvero formule matematiche che descrivono uno specifico aspetto dell'incendio o dei suoi effetti. Tali modelli sono implementabili con carta e penna – di qui la dicitura anglosassone “hand calculations” – o tramite un semplice foglio di calcolo. Noti i parametri di input, la risoluzione delle equazioni restituisce il parametro di output di interesse per il progettista.

Un esempio di modelli analitici è rappresentato dalle correlazioni di Zukoski, Heskestad, McCaffrey o Thomas per il calcolo delle caratteristiche del pennacchio dell'incendio (diametro, temperatura, velocità, portata massica) in funzione della quota al di sopra del combustibile, delle caratteristiche dell'ambiente e del focolare [1].

Questo tipo di modelli può essere ricavato a partire dalle leggi della fisica, tipicamente

assumendo specifiche condizioni al contorno e introducendo ipotesi semplificative per giungere a una formulazione pratica del metodo. Per esempio, il modello del pennacchio ideale è derivato a partire dalle leggi di conservazione della massa e del momento, con l'ausilio di diverse ipotesi che consentono di risolvere analiticamente le complesse equazioni differenziali [2].

I modelli analitici possono anche essere derivati da osservazioni sperimentali. I ricercatori scelgono questa via quando le conoscenze teoriche di un fenomeno sono limitate o quando la risoluzione matematica delle leggi fisiche è talmente complessa da risultare inapplicabile ai problemi pratici dell'ingegnere antincendio. Conseguentemente, le misurazioni raccolte durante numerosi test di laboratorio vengono trattate con l'analisi della regressione al fine di ricavare la funzione che meglio correla le grandezze note dell'esperimento (parametri di input) alle evidenze osservate (parametri di output). McCaffrey, per esempio, negli anni '70 ha derivato l'omonimo modello sulla base di numerosi test di laboratorio, le cui misurazioni sono state poi trattate con l'analisi dimensionale al fine di correlare la velocità e la temperatura del pennacchio al rateo di rilascio termico del focolare [3].

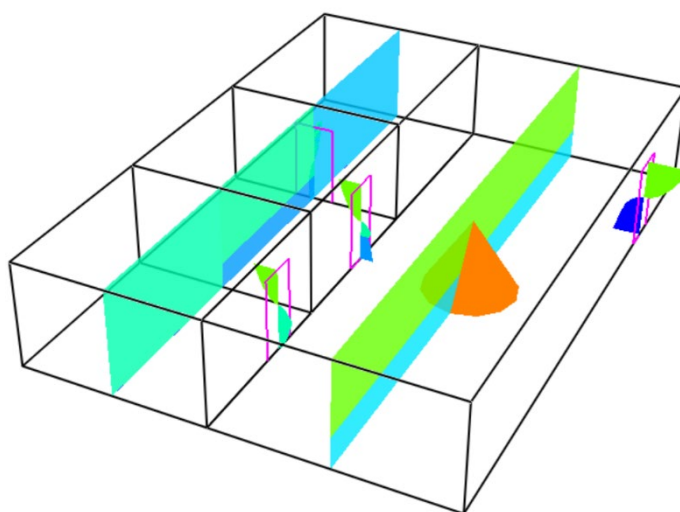


Figura 2 – Esempio di modello a zone applicato a un compartimento con stanze interconnesse

MODELLI A ZONE

Il secondo tipo di modelli prevede la rappresentazione semplificata del compartimento, tramite volumi prismatici con aperture di ventilazione rettangolari, e la successiva modellazione dell'incendio a mezzo di uno o più volumi di controllo, detti zone.

I modelli più comuni sono quelli a due zone dove l'ambiente è suddiviso in un volume che rappresenta lo strato di fumi caldi al di sotto del soffitto (upper layer o smoke layer) e in un volume di aria fredda priva dei prodotti della combustione, nella parte inferiore della stanza (lower layer o smoke-free layer). Le due zone sono messe in comunicazione dal pennacchio dell'incendio, che agisce come una pompa di massa ed energia.

Le equazioni di conservazione applicate a ciascuna zona vengono risolte numericamente in diversi istanti temporali tramite l'utilizzo di un computer che restituisce all'utilizzatore i valori medi delle grandezze nelle due zone e le caratteristiche dei flussi di fumo e aria attraverso le aperture.

La modellazione di alcune sub-routine è comunque basata su modelli analitici e ipotesi semplificative. Per esempio, nel noto codice di calcolo a zone CFAST, il pennacchio dell'incendio viene rappresentato dal modello analitico di Heskestad [4].

MODELLI NUMERICI DI CAMPO

I modelli denominati "di campo" sono i più sofisticati, in quanto basati sulla fluidodinamica computazionale, ovvero lo studio del moto dei fluidi mediante l'utilizzo di computer per risolvere equazioni complesse con metodi numerici.

Tale approccio prevede la modellazione fedele della geometria dell'edificio da analizzare, che viene poi suddivisa in un grande numero di volumi di controllo, ovvero celle di dimensione tipicamente compresa tra 5 e 50 cm. Il codice di calcolo risolve in ogni istante temporale e in ciascuna cella una forma semplificata delle equazioni di Navier-Stokes, che rappresentano le leggi di conservazione della massa, del

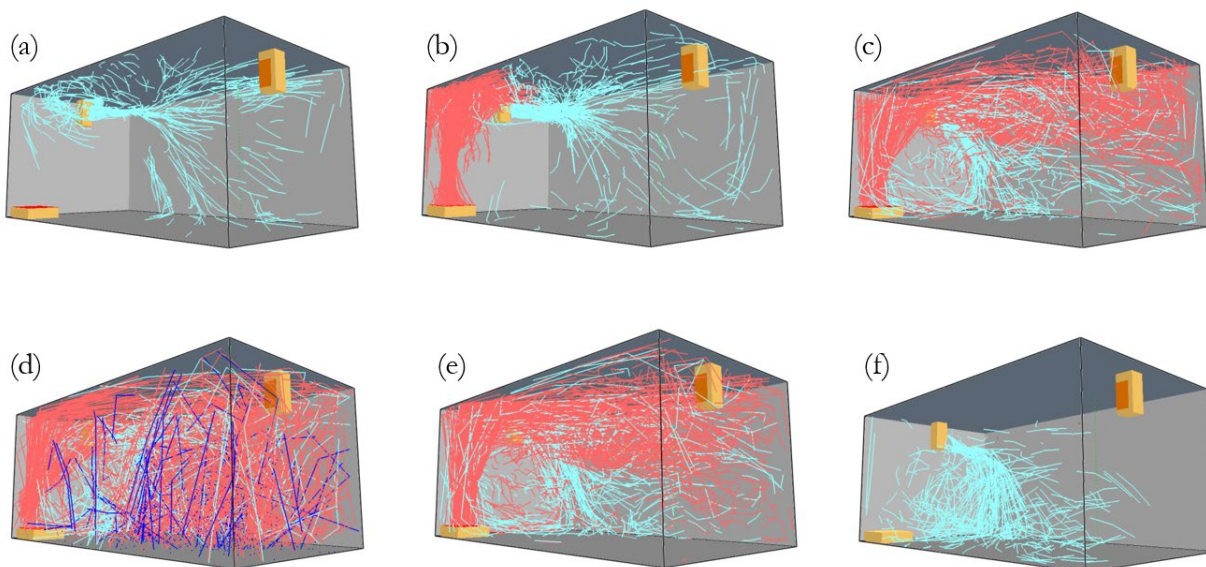


Figura 3 – Esempio di modello di campo utilizzato per analizzare la dinamica dell'incendio in ambiente confinato con sistema di ventilazione meccanica e impianto sprinkler. Visualizzazione dei flussi di aria fresca (azzurro), di aria calda (rosso) e della scarica d'acqua (blu) nelle fasi precedenti all'innesco (a), durante l'incendio (b, c, d, e), di scarica (d) e dopo l'estinzione (f).

momento, dell'energia e delle specie chimiche di un fluido in movimento.

Nella moltitudine di codici CFD, tipicamente utilizzati per svariate applicazioni dell'ingegneria civile, meccanica o aerospaziale, i modelli finalizzati alla simulazione dell'incendio sono specificatamente concepiti per studiare il trasporto di fumo e calore a bassa velocità (pertanto non sono idonei per simulare le esplosioni). Una serie di sub-modelli serve quindi a rappresentare i fenomeni legati all'incendio, quali la turbolenza, la combustione, la pirolisi, la propagazione della fiamma, il trasporto di energia, la concentrazione di particolato, ecc.

Utilizzando i codici di calcolo più diffusi, quale ad esempio Fire Dynamic Simulator (FDS), ciascun sub-modello può essere poi implementato secondo approcci alternativi. Per esempio, il sub-modello di propagazione della fiamma può essere basato su semplici correlazioni empiriche oppure sulle più complesse equazioni di Arrhenius che richiedono all'utente di definire i parametri che governano la pirolisi [5].

DISCUSSIONE

Modelli analitici – Punti di forza

Il principale punto di forza dei modelli analitici è certamente la rapidità di utilizzo. Implementando le equazioni in un foglio di calcolo, l'ingegnere antincendio può vagliare in tempo reale decine ipotesi progettuali ed eseguire così un'analisi preliminare che potrà eventualmente essere affinata con altri metodi.

In altri casi, invece, il risultato di un modello analitico è di per sé sufficiente. Si pensi a quelle circostanze in cui il progettista è interessato a ricavare i valori limite associati a un determinato fenomeno, come la temperatura massima dei gas in prossimità di un elemento strutturale, o il tempo minimo necessario per l'attivazione di una testina sprinkler. Per tali applicazioni, lo

specialista antincendio può ricorrere ai modelli di celinig jet per ricavare i valori di temperatura al variare dei parametri di input. I risultati potranno essere utilizzati direttamente per altri aspetti della progettazione, in quanto estremi e conservativi, senza la necessità di dover ricavare, con modelli più avanzati, i profili di temperatura in ogni punto della stanza.

La facilità e rapidità di calcolo consentono inoltre di eseguire approfondite analisi di sensibilità, cioè di capire come variano i risultati di output al variare dei parametri di input suscettibili di aleatorietà stocastica (es. oscillazione giornaliera della temperatura ambientale) o di incertezze epistemiche (es. il progettista non conosce l'esatto valore della conducibilità termica delle pareti di un edificio, ma stima che esso ricada in un certo intervallo). Quest'analisi consentirà di individuare i parametri più sensibili ai fini della progettazione e di investire più risorse nella loro quantificazione.

Infine, le correlazioni analitiche si prestano ad analisi di tipo probabilistico difficilmente implementabili con altri tipi di modelli. In questo caso il progettista, invece di utilizzare specifici valori dei parametri di input, può utilizzare distribuzioni di valori che tengono conto della suddetta variabilità. Ripetendo il calcolo per un elevato numero di reiteratezioni, in cui si modificano stocasticamente i dati di input, è possibile ottenere una distribuzione del risultato di output. Essa rappresenta la probabilità che il parametro di output assuma un determinato valore e può essere utilizzata per eseguire un'analisi del rischio quantitativa.

Utilizzando questo approccio, è possibile ricavare alcuni parametri progettuali dalle statistiche relative agli incendi pregressi e superare così le difficoltà legate all'individuazione di scenari deterministici sufficientemente conservativi.

Modelli analitici – Punti di debolezza

Il limite più significativo dei modelli analitici è il campo di validità: tali modelli sono ricavati per

via sperimentale o introducendo assunzioni e semplificazioni nella derivazione teorica. Pertanto, i risultati sono tanto più accurati quanto più il problema analizzato è simile ai test di laboratorio e alle ipotesi semplificative.

Per esempio, in ragione di queste ultime, il modello di Zukoski è più accurato nella zona del pennacchio distante dalla fiamma e per focolai di ridotta estensione, approssimabili a una sorgente puntiforme di fumo e calore [6]. Al contrario, il modello di Thomas è valido soltanto in prossimità del combustibile e per focolai estesi, dove l'altezza della fiamma è inferiore al suo diametro, in quanto è stato derivato tramite test di laboratorio che presentavano tale caratteristica [7].

Per essere certo della correttezza dei propri calcoli, l'ingegnere deve conoscere la teoria e le campagne sperimentali sulla base dei quali sono state derivate le equazioni. Questo è importante anche per comprendere la differenza tra i molteplici modelli analitici che rappresentano lo stesso fenomeno.

Inoltre, bisogna ricordare che l'incendio riprodotto in un ambiente controllato non è mai l'esatta rappresentazione del fenomeno reale e che l'accuratezza del modello è anche correlata alla scala dimensionale del test di laboratorio nonché alle tecniche sperimentali di misurazione.

Queste considerazioni evidenziano che il campo di applicazione ideale dei modelli analitici coincide con ambienti di scala medio-piccola, simile a quella di un laboratorio, aventi geometria regolare, privi di significative perturbazioni o variazioni temporali. Questo non significa che un modello analitico perda di validità se applicato ad altri contesti, ma che esso potrebbe dare origine a errori non trascurabili. In tale circostanza, il progettista è tenuto a validare il modello per quella specifica applicazione al di fuori del campo di applicazione "standard", ovvero deve accertarsi che i risultati del modello rappresentino correttamente il fenomeno del mondo reale.

Modelli a zone – Punti di forza

A differenza delle "hand calculations", generalmente concepite per lo studio di incendi stazionari, il calcolo computerizzato consente di analizzare fenomeni variabili nel tempo. Questo è il primo vantaggio dei modelli a zone, con cui è possibile predire la complessa dinamica di eventi transitori come un incendio crescente o gli effetti di inneschi successivi, l'apertura o chiusura di superfici di ventilazione, l'attivazione di impianti di estrazione di fumo e calore, e molti altri fenomeni che possono verificarsi in un determinato istante dello sviluppo dell'incendio. Alcuni software, inoltre, simulano la transizione da un modello a due zone, rappresentativo dell'incendio nella fase pre-flashover, a un modello a una zona, che corrisponde all'incendio pienamente sviluppato post-flashover.

Inoltre, nell'ambito di geometrie regolari, con i modelli a zone è possibile rappresentare numerosi ambienti interconnessi da porte, varchi, cavedi o sistemi di ventilazione meccanica. Pertanto, il progettista può analizzare la propagazione di fumo e calore anche al di fuori dell'ambiente dove è ubicato il focolare.

I modelli a zone sono generalmente di facile comprensione e utilizzo. Il tempo necessario per l'impostazione del codice di calcolo e per la computazione degli effetti dell'incendio è maggiore rispetto a quello richiesto dai modelli analitici, ma è pur sempre contenuto. In ogni caso, per farne un uso responsabile, il progettista deve avere conoscenza della materia, dei principi teorici, delle ipotesi, delle semplificazioni e delle limitazioni del modello.

Il software di calcolo richiede l'inserimento di un numero limitato di parametri di input, pertanto anche questo tipo di modelli ben si presta a dettagliate analisi di sensibilità. Per questo scopo è possibile programmare con Python o MATLAB uno script in grado di generare automaticamente il file di input del modello a zone ed eseguire centinaia di simulazioni. Alcuni modelli a zone come B-Risk consentono

peraltro di svolgere direttamente simulazioni probabilistiche con tecnica Monte Carlo [8].

Modelli a zone – Punti di debolezza

Il limite più importante dei modelli a zone, analogamente a quanto evidenziato per i modelli analitici, risiede nel campo di applicazione. L'utilizzo di questo metodo per analizzare l'incendio in compartimenti di grande dimensione è da trattare con cautela. Da un lato perché all'interno del modello a zone sono implementati sub-modelli analitici, per cui valgono le limitazioni trattate precedentemente. Dall'altro lato perché l'ipotesi di formazione di uno strato uniforme di fumo non è verificata se vi è una disproporzione tra la potenza del focolare e il volume dell'ambiente.

È evidente che i modelli a zone non possano nemmeno essere utilizzati in presenza di geometrie complesse (es. coperture inclinate, pozzi di luce, mezzanini, ecc.) per via della schematizzazione degli ambienti tramite volumi prismatici. In alcuni codici di calcolo, tuttavia, sono implementati specifici sub-modelli che

consentono di simulare volumi a sviluppo quasi-monodirezionale, quali corridoi e cavedi [4].

Infine, è importante ricordare che i modelli a zone consentono la stima di grandezze medie, i cui valori, nella realtà, saranno caratterizzati da distribuzioni locali e gradienti. Pertanto, tale approccio allo studio della dinamica dell'incendio è idoneo in quelle situazioni in cui le grandezze medie sono sufficienti a verificare gli obiettivi del progetto (es. altezza e temperatura media dello strato di fumo), mentre risulterebbe inadeguato per lo studio dettagliato di fenomeni locali, come la velocità dell'aria in prossimità di una superficie di estrazione o la concentrazione di gas tossici in una determinata posizione del compartimento.

Modelli di campo – Punti di forza

Tra i diversi tipi di modelli, quelli di campo sono indubbiamente i più versatili, in quanto la discretizzazione del dominio in migliaia di celle – se non milioni – consente di approssimare qualsiasi geometria. In questo caso, il limite di utilizzo è imposto essenzialmente dalla

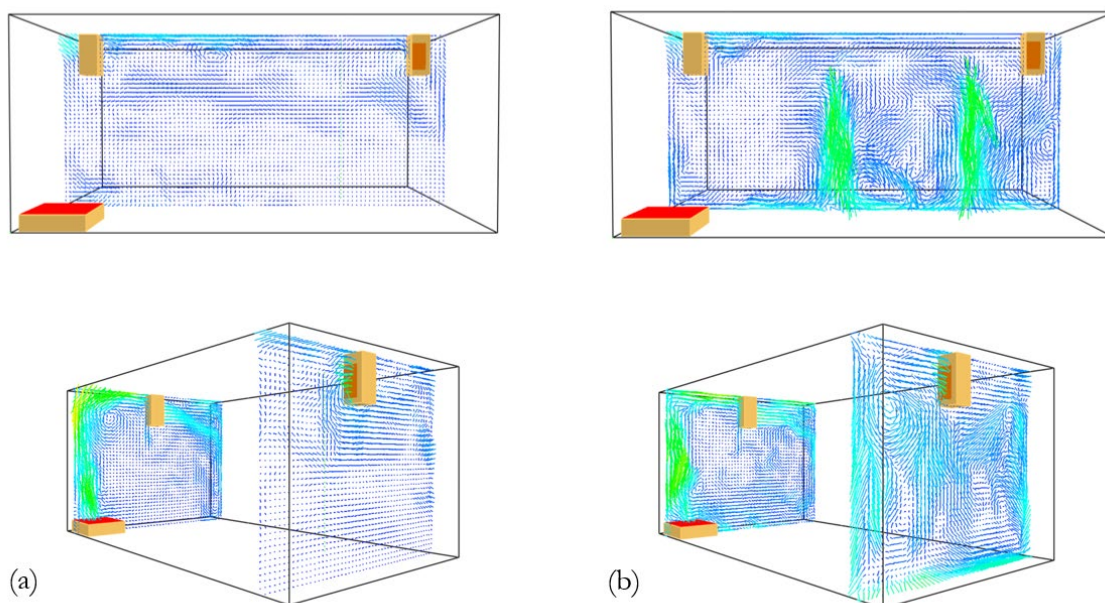


Figura 4 – Analisi CFD per determinare la velocità locale dei flussi d'aria generati dal sistema di ventilazione meccanica (a) e dall'attivazione dell'impianto sprinkler (b)

dimensione della mesh, che influenza il tempo di calcolo.

L'uso dei modelli CFD è dunque la scelta più appropriata quando si deve studiare la dinamica dell'incendio in ambienti irregolari, come nel caso di edifici storici con coperture a volta, moderni centri commerciali con mall coperte, ballatoi e interconnessioni tra livelli o grandi edifici destinati alla logistica con layout spaziali e impiantistici complessi. La risoluzione delle equazioni in ogni cella della mesh consente l'analisi di fenomeni per i quali non esistono modelli generali, in quanto specificatamente correlati alle peculiarità dell'edificio oggetto di studio.

L'impiego di modelli di campo è necessario anche quando il progettista vuole studiare gli effetti localmente prodotti dall'incendio in un preciso punto del dominio, compresi quei casi in cui sarebbe possibile l'impiego di un modello a zone, ma le grandezze medie risultanti non sarebbero sufficienti allo scopo del progetto. Ad esempio, l'approccio CFD consente di analizzare non soltanto l'altezza e la temperatura media del layer di fumo, ma anche di visualizzare i flussi d'aria che concorrono alla sua formazione e perturbazione, potenziali effetti di ricaduta del fumo e di backlayering in prossimità delle pareti, possibili fenomeni di plug holing in corrispondenza dei punti di estrazione di un sistema di evacuazione di fumo e calore, concentrazioni di particolato e gas tossici lungo il percorso degli occupanti che evacuano l'edificio, temperature locali in corrispondenza di determinati elementi strutturali o di particolari beni da salvaguardare.

Inoltre, progettare con i valori medi o estremi ricavati da modelli semplificati conduce tipicamente a un sovradimensionamento delle misure antincendio, evitabile con analisi avanzate.

Modelli di campo – Punti di debolezza

Lo scotto da pagare per l'ottenimento di risultati estremamente dettagliati è prima di tutto un

maggiore investimento in termini di tempo e risorse. L'analisi con modelli CFD richiede infatti tempi di compilazione e di calcolo significativi (diverse settimane per uno scenario complesso) e si devono inoltre considerare le risorse che il professionista deve investire per disporre di un'adeguata potenza di calcolo e per il costante aggiornamento delle competenze specialistiche, così da tenere il passo con la continua evoluzione dei modelli. Pertanto, salvo nei casi sopra citati, l'utilizzo dei modelli di campo potrebbe non essere conveniente.

Inoltre, un'analisi con metodo CFD può essere affrontata esclusivamente con approccio deterministico, ovvero il progettista deve definire a priori tutti i parametri di input e otterrà un unico risultato di output. Al di là della obbligatoria analisi di sensibilità necessaria a verificare che la dimensione della griglia di calcolo è stata scelta correttamente, generalmente il progettista può permettersi di indagare un limitato numero di soluzioni alternative e di variazioni dei parametri di input più rilevanti. Con i modelli di campo non è possibile eseguire l'analisi di sensibilità su tutti i parametri incerti, né tantomeno analisi probabilistiche o di propagazione delle incertezze che scaturiscono dall'interazione di tali parametri. In questi casi, i valori devono essere trattati con giudizio esperto e stime conservative.

Per questo motivo, al fine di scongiurare il noto effetto "trash in, trash out", è sconsigliabile optare per un'analisi avanzata quando si hanno scarse informazioni o grandi incertezze iniziali. Bisogna cioè evitare di trattare i modelli CFD come strumenti infallibili e riconoscere che i risultati prodotti dal più accurato algoritmo di calcolo, se derivati da presupposti incerti, saranno privi di significato. Peraltro, vista la singolarità degli scenari solitamente trattati con i modelli di campo, non è semplice validare i risultati sulla base di esperimenti reali o casi di studio.

Dunque è importante che l'utilizzatore dei modelli avanzati abbia le idonee competenze

per riconoscere il campo di applicazione, le ipotesi e i limiti dei software CFD. Infatti, allo stato attuale, numerosi sub-modelli sono ancora oggetto di sviluppo e la simulazione di fenomeni quali ad esempio la pirolisi, la propagazione della fiamma, la combustione in ambiente sottoventilato, l'interazione tra fuoco e agenti estinguenti richiedono l'adozione di particolare cautela ed attenta validazione dei risultati.

Inoltre, il grande numero di parametri che devono essere dati in pasto al codice di calcolo, rende le analisi con metodo avanzato più suscettibili a errori commessi da parte dell'utilizzatore.

Il progettista deve quindi avere una formazione nelle discipline scientifiche della chimica, della fisica, della combustione, della dinamica dell'incendio. Deve comprendere come la rappresentazione teorica del fenomeno incendio viene tradotta all'interno del codice con l'ausilio delle tecniche di calcolo numerico. Deve avere l'esperienza per riconoscere i parametri di input più rilevanti e la sensibilità per valutare criticamente i risultati di output. Deve sapere quantificare le incertezze associate alle proprie analisi e riconoscere i casi in cui l'utilizzo della modellazione non è attendibile ed è preferibile fare riferimento a test di laboratorio o adottare modelli più semplici, che consentono però di effettuare analisi probabilistiche.

Mi piace paragonare l'utilizzo dei modelli di campo al tiro con l'arco: di fronte alle difficoltà intrinseche dell'esercizio – che nel mondo dell'ingegneria sono dovute alle incertezze – il buon esito del tiro dipenderà in parte dalla precisione dello strumento, l'arco o il modello, in parte dalla preparazione del tiratore o, nel nostro caso, del professionista antincendio.

CONCLUSIONI

Le presenti riflessioni non hanno la pretesa di essere una guida esaustiva alla scelta dei modelli d'incendio, ma forniscono una panoramica ed alcuni spunti di riflessione sugli

approcci a disposizione del progettista che adotta i metodi ingegneristici.

Del resto, non sarebbe nemmeno possibile giungere facilmente a una tale semplificazione: l'analisi evidenzia che i confini tra le aree di applicazione dei diversi approcci sono sfumati e non è possibile definire categoricamente il tipo di modello migliore in assoluto. Piuttosto, ci si deve riferire al modello più appropriato ad ogni specifico caso di studio e alla rappresentazione della realtà che si vuole ottenere.

Probabilmente, laddove più modelli condividono lo stesso campo di applicazione, l'utilizzo combinato di diverse metodologie rappresenta l'approccio progettuale più efficace e robusto. Per esempio, è possibile utilizzare un modello analitico con approccio probabilistico per individuare lo scenario d'incendio ragionevolmente più gravoso da implementare in un modello a zone o di campo. Oppure è possibile eseguire un predimensionamento delle misure antincendio con un modello a zone, quindi eseguire la progettazione di dettaglio con un modello CFD. O ancora, si può utilizzare un modello analitico per verificare la correttezza dei risultati di una simulazione fluidodinamica. Per un approfondimento sulle strategie di progettazione con approccio ibrido, si suggerisce di proseguire nella lettura di alcuni interessanti spunti presentati da Tofiło, Węgrzyński e Porowski in [9].

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.J. Hurley, D. Gottuk, J.R. Hall, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchovsky, J. Torero, J.M. Watts, C. Wieczorek, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition, Springer, 2016.
- [2] B. Karlsson, J. Quintiere, Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, 1999.
- [3] B.J. McCaffrey, J.A. Rockett, Static Pressure Measurements of Enclosure Fires, Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1977.
- [4] R.D. Peacock, G.P. Forney, P.A. Reneke, CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke

Transport (Version 7) Volume 1: Technical Reference Guide, NIST Technical Note 1889v3 CFAST, 2015.

- [5] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, K. Overholt, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-1, 2020.
- [6] E.E. Zukoski, T. Kubota, B. Cetegen, Entrainment in fire plumes, Fire Safety Journal, 1981.
- [7] P.H. Thomas, P.L. Hinkley, C.R. Theobald, D.L. Sims, Investigation into the Flow of Hot Gases in Roof Venting, Fire Research Technical Paper - H.M. Stationery Office, 1963.
- [8] C. Wade, G. Baker, K. Frank, A. Robbins, R. Harrison, M. Spearpoint, C. Fleischmann, B-Risk User Guide and Technical Manual, Branz Study Report 282, 2013.
- [9] P. Tofiło, W. Węgrzyński, R. Porowski, Hand Calculations, Zone Models and CFD – Areas of Disagreement and Limits of Application in Practical Fire Protection Engineering, 11th Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, 2016.

FIRE SAFETY ENGINEERING: CHOOSING THE CALCULATION MODEL

AUTHOR: Lorenzo Contini.

Graduated in Building Engineering at Polytechnic University of Milan, he designs fire safety of complex facilities. He is specialized in performance-based methods, thanks to the technical preparation gained through the International Master of Science in Fire Safety Engineering (IMFSE) and the experience acquired in many years of collaboration with consultancy firms. In particular, he is expert in the analysis with simplified and advanced models of fire dynamics, occupants' evacuation, and the interaction between the two events. He takes part in workgroups and is a lecturer at seminars on fire safety.

ABSTRACT

Numerous calculation models for fire safety engineering are currently available on the international scene, aimed at predicting fire dynamics or occupants' evacuation. The most appropriate model should be chosen for each project based on the application field, the complexity and characteristics of the building, the skills of the designer, the level of detail that is desired for the representation of reality. An overview of the available fire models (analytical, zone, field) is presented, followed by a discussion of the strengths and weaknesses of each type.

INTRODUCTION

The technological evolution and the transformation of society in recent decades have promoted the birth and proliferation of new architectural typologies and unconventional design solutions. High rise, irregular shapes, large crowds, new materials, are few of the new risk sources associated with the spread of fire, the evacuation of people, and structural safety.

Fortunately, in recent years, the scientific disciplines that study phenomena related to fire and human behaviour in emergency situations have made great strides forward too. Supported by the spread of performance-based standards, today's fire safety experts dispose of several references and calculation models for engineering design, to be used in those contexts that cannot meet prescriptive requirements.

A calculation model is the quantitative representation of a physical phenomenon, conceived to represent the real world as faithfully as possible. In the field of fire safety engineering, models are used to predict fire development, occupants' movement or structural response to thermal exposure. With that information it is possible to design fire protection measures that ensure a safe intervention in case of fire and counteract the adverse consequences of incidental events. In the field of fire investigation, models are also used to reconstruct a fire that has already occurred, to identify its causes.

The term "calculation model", however, refers broadly to a multitude of approaches with variable levels of sophistication, ranging from simple analytical equations to complex computer codes. Therefore, one of the first steps of the performance-based design process is choosing the most suitable model for the analysis.

One would imagine that a fire safety design begins with the application of the simplest models and proceeds with subsequent refinements using methods of increasing complexity, if necessary. However, professionals do not always practice this progression and sometimes decide to use sophisticated models as their only design approach. This evidence can be explained by the belief that advanced computational fluid dynamics (CFD) models are more accurate than other methods. In reality, their use requires great skills, time and resources, and this does

not necessarily correspond to the optimal choice for "simple" case studies.

Moreover, the indiscriminate use of CFD models can lead to the controversial situation in which authorities having jurisdiction require elaborate analysis for the solution of simple problems. In turn, this mines the efficiency of

them will be discussed, in order to direct the reader towards an informed choice.

FIRE MODELS

As the word suggests, fire models are aimed at studying the dynamics of a fire and the conditions produced within an enclosure. Some quantities of interest in a FSE analysis are

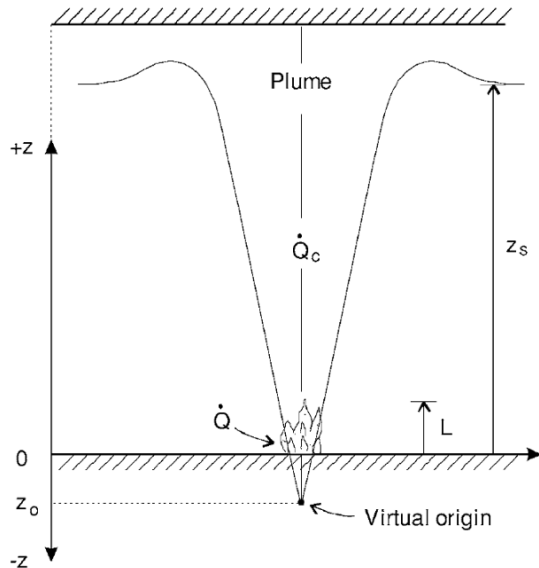


Figure 1 – Example of an analytical model: Heskestad model for the calculation of radius, temperature and velocity of the fire plume. Image from [2]

$$b = 0.12 \left(\frac{T_0}{T_\infty} \right)^{1/2} (z - z_0)$$

$$\Delta T = 9.1 \left(\frac{T_\infty}{g c_p^2 \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3}$$

$$u_0 = 3.4 \left(\frac{g}{c_p T_\infty \rho_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{-1/3}$$

fire safety consultants and the simplification of fire protection procedures.

Instead, each calculation model has its own strengths and weaknesses, and the choice of the most appropriate method must be conducted for each project based on the application field, the complexity and characteristics of the building, the skills of the designer, the level of detail that is desired for the representation of reality. In fact, fire safety engineers have a multitude of tools in their toolbox: it is up to them to identify the most suitable and effective tool for the problem they face.

The following paragraphs represent a review of the fire models that are most frequently used in national and international environments. Three types of models characterized by increasing complexity will be described (analytical, zone, field). The strengths and weaknesses of each of

typically the height of the smoke layer and of the uncontaminated air layer, the time of glass breakage or activation of protection systems, smoke temperature in the proximity structural elements, thermal radiation on a target, concentrations of toxic gases, visibility through smoke, the time of flashover and many other parameters.

ANALYTICAL MODELS

The most practical models are analytical, which are mathematical equations that describe a specific characteristic of the fire or its effects. These models can be implemented with pen and paper – hence the term “hand calculations” – or through a simple spreadsheet. Knowing the input parameters, the solution of the equations provides the output parameter of interest to the designer.

Some examples of analytical models are Zukoski, Heskestad, McCaffrey or Thomas correlations to determine the characteristics of the fire plume (diameter, temperature, velocity, mass flow) as a function of the height above the fuel, the characteristics of the environment and burner [1].

This type of model can be derived directly from the laws of physics. Typically, specific boundary conditions and assumptions are introduced to get a practical formulation of the method. For instance, the ideal plume model is derived from the conservation laws of mass and momentum, together with various simplifications that allow to solve the complex set of differential equations [2].

Analytical models can also be derived from experimental observations. Researchers might choose this approach when the theoretical knowledge of a phenomenon is limited or when the mathematical solution is too complex to be applicable to practical engineering problems. Consequently, the measurements collected from numerous laboratory tests are treated with regression analysis to derive a function that correlates the known quantities of the experiment (input parameters) to the observed evidence (output parameters). McCaffrey, for example, in the 1970s derived its model based on numerous laboratory test results that were

treated with dimensional analysis in order to correlate plume speed and temperature to the fire heat release rate [3].

ZONE MODELS

The second type of models require a simplified representation of the fire enclosure through prismatic volumes with rectangular ventilation openings. Next, the fire is modelled by means of one or more control volumes called “zones”.

The most common are two-zone models, where the room is divided into a volume that represents the hot gas layer below the ceiling (upper layer or smoke layer) and a volume of cold air free of combustion products, in the lower part of the enclosure (lower layer or smoke-free layer). The two zones are connected by the fire plume, which acts as a pump of mass and energy.

Conservation equations are applied to each zone and solved numerically at different time steps with the aid of a computer. The outputs are average values of the quantities in the two zones and the characteristics of smoke and air flows through the openings.

The modelling of some sub-routines is still based on analytical models and simplifying assumptions. For example, when using the well-known zone model CFAST, the fire plume

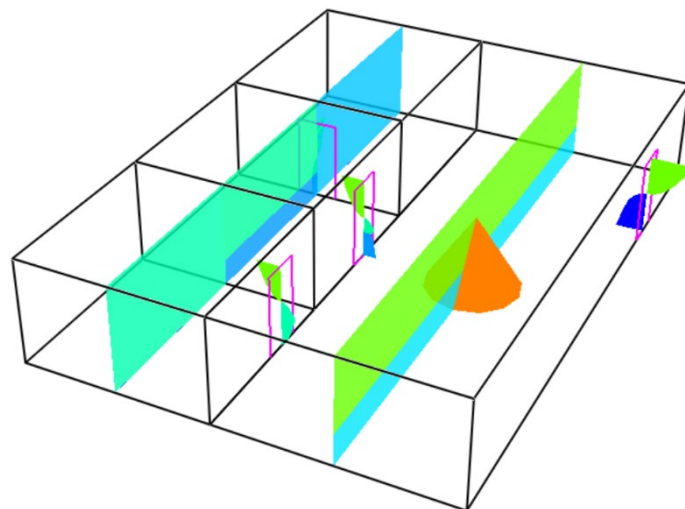


Figure 2 – Example of a zone model applied to a multi-room compartment

is represented by Heskestad analytical model [4].

FIELD MODELS

Field models are the most sophisticated, since they rely on computational fluid dynamics, which is the study of fluids motion using computers to solve complex equations with numerical methods.

This approach requires a precise modelling of the enclosure geometry, which then is divided into a large number of control volumes, or cells of about 5 to 50 cm. The code solves a simplified form of the Navier-Stokes equations in every cell and at every time step, which represent the conservation laws of mass, momentum, energy and chemical species of a fluid in motion.

Among many CFD codes, which are used for several applications in civil, mechanical, or aerospace engineering, fire models are specifically designed to analyse smoke and heat transfer at low speed (hence they are not

suitable to simulate explosions). A set of sub-models is used to represent fire-related phenomena such as turbulence, combustion, pyrolysis, flame spread, energy transport, soot concentration, etc.

When using the most common codes, such as Fire Dynamic Simulator (FDS), each sub-model can be implemented according to alternative approaches. For example, the sub-model for flame spread can be implemented through simple empirical correlations or through more complex Arrhenius equations that require to input the parameters that affect pyrolysis [5].

DISCUSSION

Analytical model – Strengths

The main strength of analytical models is certainly the speed of use. By implementing the equations in a spreadsheet, fire engineers can screen in real time dozens of design hypotheses and perform a preliminary study that can be refined with other methods later.

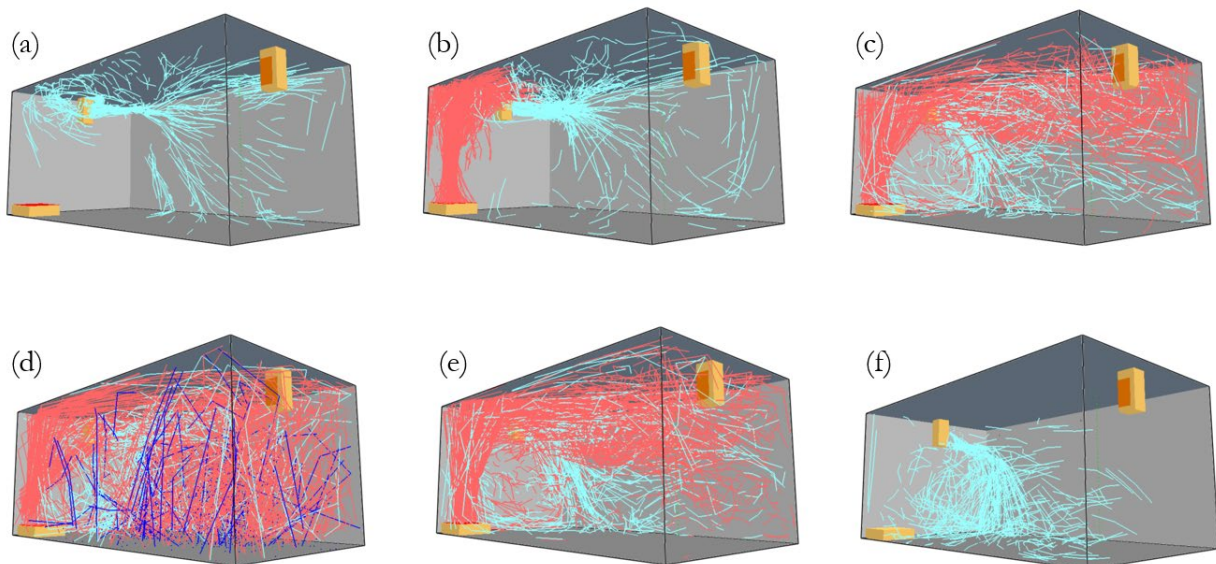


Figure 3 – Example of field model used to analyse fire dynamics in a well-confined enclosure with mechanical ventilation and sprinkles. Visualization of the flows of fresh air (cyan), hot air (red) and water discharge (blue) before ignition (a), during steady burning (b, c, d, e), during discharge (d) and after ignition (f).

In other cases, however, the result of an analytical model is sufficient by itself. Think about those circumstances when designers are interested in the limiting values associated with a certain phenomenon, such as the maximum gas temperature close to a structural element, or the minimum time required for sprinklers activation. For such applications, engineers can use a ceiling jet model to derive the temperature values as the input parameters vary. Results can be used directly for other parts of the design process, as they are extreme and conservative, without the need to use advanced models to obtain the temperature profiles at every location in the room.

The ease of calculation also allows to perform in-depth sensitivity analysis i.e. to understand how results vary when the input parameters are modified. This may be useful when the inputs are susceptible of stochastic variability (e.g. daily fluctuation of ambient temperature) or epistemic uncertainty (e.g. the engineer does not know the exact value of the thermal conductivity of the walls of a building, but can estimate that it falls within a certain range). The analysis will allow to identify the most sensitive parameters for design purposes and to invest more resources in their quantification.

Finally, analytical correlations allow for probabilistic analysis, which is difficult to implement with other types of models. In this case designers, instead of using specific values for the input parameters, use distributions that consider the mentioned variability. By repeating the calculation for many iterations, in which the input parameters are modified stochastically, it is possible to obtain a distribution of the output parameter. It represents the probability that the output parameter is larger than a certain value and can be used to perform a quantitative risk assessment.

With this approach, it is possible to derive some design parameters from the statistics about past fire events and overcome the difficulties associated with identifying deterministic scenarios that are sufficiently conservative.

Analytical models – Weaknesses

The greatest limitations of analytical models are the validity boundaries: hand calculations are based on experimental results or rely on assumptions and simplifications in the theoretical derivation. Therefore, the more the analysed problem is similar to laboratory set-up or assumptions, the more accurate the results.

For example, because of the assumptions, Zukoski model is more accurate in far field from the plume and for small fires that can be approximated to a point source of smoke and heat [6]. On the contrary, Thomas model is valid only in the proximity of the fuel and for large fires, where the height of the flame is smaller than its diameter, as it was derived through laboratory tests with these attributes [7].

To be confident in the correctness of the calculations, fire engineers should be familiar with the theory and the experimental campaigns that lead to the derivation of analytical equations. This is important also to understand the differences between multiple analytical models that represent the same phenomenon.

Furthermore, users should remember that a fire produced in a controlled environment is never the exact representation of the real phenomenon and that the accuracy of the model is also related to experimental scale and measurement techniques.

These considerations highlight that the ideal application field of analytical models is at room scale, similar to that of a laboratory, with regular geometry, without significant perturbations or temporal variations. It does not mean that analytical models lose their validity if applied to other contexts, but that they could lead to larger errors. Under these circumstances, designers are required to validate the model for the specific use outside the standard application field and make sure that the results of the model represent the real-world phenomenon correctly.

Zone models – Strengths

Unlike hand calculations, generally conceived for the study of steady-state fires, computer calculations allow to analyse phenomena that vary over time. This is the first advantage of zone models, which can predict the complex dynamics of transient events such as a growing fire or the effects of subsequent ignitions, of the opening or closing of ventilation surfaces, of the activation of ventilation systems and of many other phenomena that can occur at a given time frame of the fire development. Some software can also simulate the transition from a two-zone model, representative of the fire in the pre-flashover stage, to a one-zone model, which corresponds to the fully developed post-flashover fire.

Furthermore, in the context of regular geometries, with zone models it is possible to represent several rooms connected by doors, passages, shafts, or ventilation systems. Therefore, designers can analyse the spread of smoke and heat outside of the initial fire room.

Zone models are generally easy to understand and use. The time required for setting-up the code and for calculating the effects of the fire is greater than the time required by analytical models, but still relatively short. In any case, for a responsible use, designers should know the theoretical principles, assumptions, simplifications, and limitations of the model.

The software requires to input a limited number of parameters, therefore also this type of models is suitable for detailed sensitivity analysis. For this purpose, it is possible to create a Python or MATLAB script that automatically generates the zone model input file and runs hundreds of simulations. Some zone models such as B-Risk allow to carry out probabilistic simulations with built-in Monte Carlo techniques [8].

Zone models – Weaknesses

The biggest limitation of zone models, similarly to what has been highlighted for analytical ones, lies in the application field. The use of this method to analyse fires in large compartments

must be treated with caution. On one hand, because some analytical sub-models are implemented within the zone model, for which the aforementioned limitations apply. On the other hand, because the hypothesis of the formation of a uniform smoke layer is not verified if there is a disproportion between the fire intensity and the enclosure size.

Also, zone models cannot be used in the presence of complex geometries (e.g., inclined roofs, large shafts, mezzanines, etc.) due to the approximation of rooms to prismatic volumes. However, some codes include specific sub-models that allow to simulate enclosures with quasi-one-dimensional development, such as corridors and shafts [4].

Finally, it is important to remember that zone models allow to estimate average quantities which, in reality, will be characterized by local distributions and gradients. Hence, this approach to the study of fire dynamics is suitable in those situations where the average quantities are sufficient to verify design objectives (e.g. average smoke layer height and temperature). It would be inadequate for the detailed study of local phenomena, such as the velocity of the air in the surroundings of an extraction surface or the concentration of toxic gases at a specific location of the compartment.

Field models – Strengths

Among the different types, field models are undoubtedly the most versatile, as the discretization of the domain in thousands of cells (if not millions) allows to approach any geometry and shape. In this case, the limits of use are essentially imposed by the mesh size, which affects the computation time.

Therefore, the use of CFD models is the appropriate choice when designers need to study fire dynamics within an irregular enclosure, such as in the case of historical buildings with vaulted roofs, modern shopping centres with covered malls, balconies and interconnections between levels or large logistics warehouses with complex layouts. The

resolution of the equations in every cell of the mesh allows to analyse of phenomena which cannot be represented by generic models, as they are specifically related to the peculiarities of the building.

The use of field models is also necessary when engineers want to study local effects produced by the fire at a precise location of the domain, including those cases in which the use of a zone model would be possible, but the resulting average quantities would not be sufficient for the project scope. For example, CFD allows to assess not only the height and the average temperature of the smoke layer, but also to visualize air flows that contribute to its formation and perturbation, potential smoke fallout and backlayering effects near the walls, possible plug holing phenomena due to smoke and heat ventilation, concentrations of soot and toxic gases along the path of occupants evacuating the building, local temperatures near specific structural elements or goods to be protected.

Furthermore, average or extreme values derived from simplified models typically lead to a conservative design of fire protection

measures that can be avoided with advanced analysis.

Field models – Weaknesses

The price to pay for extremely detailed results is a greater investment of time and resources. In fact, analysis with CFD models requires significant compilation and computation time (several weeks for a complex scenario) and it is also necessary to consider the resources that professionals must invest to dispose of adequate computing power and for the constant update of specialized skills, to keep up with the continuous evolution of computer models. Therefore, beyond the mentioned cases, the use of field models may not always be convenient.

Furthermore, CFD analysis can be treated only with a deterministic approach, i.e. designers must define in advance all the input parameters and will get a single output result. Beyond the mandatory sensitivity analysis required to demonstrate that the grid size is correct, typically fire safety engineers can investigate a limited number of alternative solutions and variations of the most relevant input parameters. With field models it is not possible

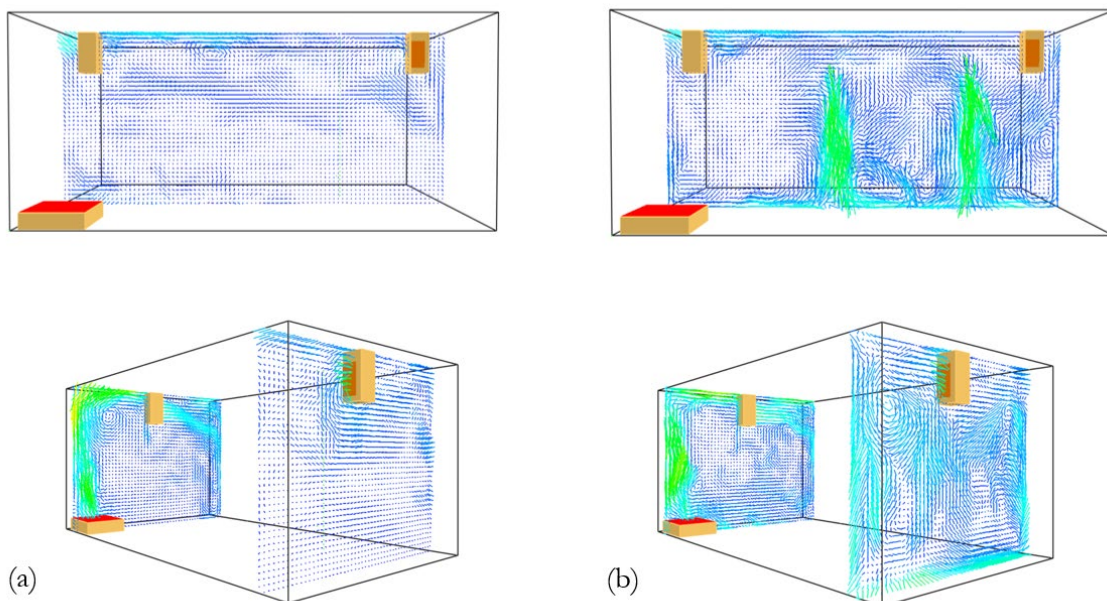


Figure 4 – CFD analysis to assess the local velocity of air flows generated by the mechanical ventilation system (a) and by sprinklers activation (b)

to perform a sensitivity analysis of all uncertain parameters, nor probabilistic analyses or the propagation of uncertainties that derive from the interaction of the parameters. In these cases, inputs must be treated with expert judgment and conservative estimates.

For this reason, to avoid the well-known "trash in, trash out" effect, it is not recommended to perform an advanced analysis in the presence of great initial uncertainties. In other words, we must avoid treating CFD models as infallible tools and recognize that the results produced by the most accurate calculation algorithm are meaningless if derived from uncertain assumptions. Moreover, validating the results with experimental data or case studies is not a trivial task, due to the uniqueness of the scenarios that are typically analysed with field models.

Hence, it is important that users of advanced models possess the appropriate skills to recognize the application field, assumptions, and limitations of a CFD code. In fact, nowadays, several sub-models are still under development and the simulation of phenomena such as pyrolysis, flame spread, combustion in an under-ventilated environment, the interaction between fire and extinguishing agents require caution and careful validation of results.

In addition to this, the large number of parameters that need to be fed into the code makes advanced analysis more susceptible to user errors.

In conclusion, designers must have a training in the scientific disciplines of chemistry, physics, combustion, and fire dynamics. They need to understand how the theoretical representation of fire phenomena is translated into the code through numerical methods. They must have the experience to recognize the most relevant input parameters and the sensitivity to judge critically the output results. They must be able to quantify the uncertainties associated with their analysis and recognize those cases in which modelling is not reliable and it is

preferable to refer to laboratory tests or adopt simpler models, which in turn allow probabilistic analysis.

I like to compare the use of field models to archery: despite the intrinsic difficulties of the exercise – which in the engineering world are represented by uncertainties – successful results will partly depend on the accuracy of the tool, the bow or model, and partly on the preparation of the athlete or, in our case, the fire expert.

CONCLUSIONS

These reflections do not aspire to be an exhaustive guide for the selection of fire models but provide an overview and some elements of evaluation on performance-based design tools.

It would not even be possible to easily reach such a simplification: the analysis shows that the boundaries between the application field of different approaches are blurred, and it is not possible to clearly define the best type of model in absolute terms. Rather, we should refer to the most appropriate model for each specific case and for the representation of reality that we want to obtain.

Probably, where multiple models share the same applicability field, the combined use of different methodologies represents the most effective and robust design approach. For instance, it is possible to use an analytical model with a probabilistic approach to identify the worst credible scenarios to be implemented in a zone or field model. Or it is advisable to perform a preliminary design of safety measures with a zone model, then perform detailed design with a CFD model. Or an analytical model can be used to verify the correctness of the results of a fluid dynamics simulation. For an in-depth analysis of design strategies with a hybrid approach, the reader can refer to some interesting suggestions presented by Tofiło, Węgrzyński and Porowski in [9].

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.J. Hurley, D. Gottuk, J.R. Hall, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchovsky, J. Torero, J.M. Watts, C. Wieczorek, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition, Springer, 2016.
- [2] B. Karlsson, J. Quintiere, Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, 1999.
- [3] B.J. McCaffrey, J.A. Rockett, Static Pressure Measurements of Enclosure Fires, Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1977.
- [4] R.D. Peacock, G.P. Forney, P.A. Reneke, CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 1: Technical Reference Guide, NIST Technical Note 1889v3 CFAST, 2015.
- [5] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, K. Overholt, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-1, 2020.
- [6] E.E. Zukoski, T. Kubota, B. Cetegen, Entrainment in fire plumes, Fire Safety Journal, 1981.
- [7] P.H. Thomas, P.L. Hinkley, C.R. Theobald, D.L. Sims, Investigation into the Flow of Hot Gases in Roof Venting, Fire Research Technical Paper - H.M. Stationery Office, 1963.
- [8] C. Wade, G. Baker, K. Frank, A. Robbins, R. Harrison, M. Spearpoint, C. Fleischmann, B-Risk User Guide and Technical Manual, Branz Study Report 282, 2013.
- [9] P. Tofiło, W. Węgrzyński, R. Porowski, Hand Calculations, Zone Models and CFD – Areas of Disagreement and Limits of Application in Practical Fire Protection Engineering, 11th Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, 2016.

3 Incendi nell'interfaccia urbano-foresta: il progetto WUIVIEW
Fires at the Wildland-Urban Interface: the WUIVIEW project

INCENDI NELL'INTERFACCIA URBANO-FORESTA: IL PROGETTO WUIVIEW

Autore: Pascale Vacca, Fire Safety Engineer and Ph.D. student at CERTEC, UPC

Bio

Laureata in Fire Safety Engineering con un corso di studi internazionale (IMFSE), ha lavorato come consulente per un'azienda con sede in Belgio, occupandosi principalmente della protezione e prevenzione incendi di fabbricati civili e della progettazione di sistemi antincendio con metodo prestazionale. Attualmente svolge il Dottorato di Ricerca presso l'Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) e fa parte del team di ricerca CERTEC, dove si occupa principalmente dello studio di incendi boschivi che raggiungono l'interfaccia urbano-foresta.

ABSTRACT

Il progetto WUIVIEW è stato ideato per sviluppare strumenti di gestione dei rischi per aiutare le comunità europee di interfaccia urbano-foresta a adattarsi alla nuova generazione di incendi boschivi. Le diverse fasi del progetto consistono nel caratterizzare i pericoli dei diversi tipi di materiali combustibili presenti nell'interfaccia, nell'identificare, progettare e modellare scenari tipici di queste aree. Come risultato del progetto sono stati sviluppati tre strumenti, due di tipo qualitativo, in forma di questionari, e uno di tipo quantitativo, ovvero una guida per l'analisi con metodologia prestazionale specifica per le zone di interfaccia urbano-foresta.

1. INTRODUZIONE

Gli incendi boschivi sono parte integrante delle dinamiche forestali in molti ecosistemi, in cui sono parte essenziale del rinnovo forestale. I naturali regimi incendiari e il rischio di incendi boschivi sono sempre più influenzati dai cambiamenti climatici: è stato osservato, infatti, un aumento della frequenza e dell'intensità dei periodi di siccità e delle ondate di caldo, che causa l'espansione verso nord delle aree a rischio di incendio, nonché il prolungamento delle stagioni degli incendi in quelle già a rischio [1]. Prova di ciò sono, ad

esempio, gli incendi verificatisi nell'Artide nel Giugno del 2019, che hanno rilasciato nell'atmosfera la stessa quantità di CO₂ di tutti gli incendi avvenuti nello stesso mese tra il 2010 e il 2018 [2]. In Europa, Portogallo, Spagna, Italia, Grecia e Francia rappresentano circa l'85% della superficie totale incendiata ogni anno [3] e, nel 2020, l'Italia è stato il Paese europeo più colpito per numero di incendi e il quarto in termini di superficie incendiata, con 53,807 ha [4]. Gli incendi più vasti si sono verificati in Sicilia e Sardegna. A metà della stagione degli incendi del 2021 i danni sono già ingenti: a luglio un incendio ha bruciato oltre 20,000 ha nella provincia di Oristano (quasi il 40% della superficie totale incendiata nell'anno precedente). Sono circa 1500 le persone sfollate, case e aziende sono state danneggiate e animali sono arsi vivi [5].

Le zone in cui le aree boschive incontrano lo sviluppo urbano costituiscono la cosiddetta *interfaccia urbano-foresta* (WUI dall'inglese *Wildland-Urban Interface*). La frequenza e la gravità degli incendi boschivi che raggiungono queste zone sono aumentate negli ultimi decenni, così come la quantità di edifici distrutti ogni anno. Ciò è dovuto anche all'aumento dello sviluppo urbano nelle zone rurali, destinato a crescere nel prossimo futuro [6]. Si prevede pertanto un incremento delle conseguenze di questi incendi, che potranno essere di natura economica, sociale o ambientale.

Gli incendi di interfaccia urbano-foresta pongono inoltre notevoli sfide gestionali in tema di protezione della popolazione e mitigazione degli incendi, poiché i Vigili del Fuoco e la Protezione Civile non sempre riescono a rispondere simultaneamente alla soppressione dell'incendio, all'esodo della popolazione e alla protezione degli edifici [7]. Qualora la quantità di edifici in fiamme o a rischio d'incendio superasse la capacità di operatività dei servizi antincendio, l'efficacia di questi verrebbe ridotta e molti edifici non potrebbero essere protetti adeguatamente [6]. L'autoprotezione è quindi diventata sempre più una necessità e, negli anni a venire, l'attenzione dovrà essere posta sullo sviluppo

di comunità adattate al fuoco, in grado di coesistere con gli incendi boschivi [7].

Gli incendi che hanno raggiunto la WUI negli ultimi anni, come quello in Sardegna appena menzionato, o quelli in Grecia nel 2018 (101 vittime e 998 edifici distrutti), e in Portogallo nel 2017 (65 vittime e 457 edifici distrutti) [7] hanno evidenziato la necessità di una strategia comune tra gli Stati europei per la difesa e la prevenzione di questo tipo di eventi. Ad oggi, l'Unione Europea, nel suo insieme, e i singoli Stati membri, stanno sviluppando, seppur tardivamente, nuove ed appropriate normative e attuando politiche per la protezione delle aree WUI. Inoltre, le attuali politiche nazionali di gestione della sicurezza della WUI implicano una complessa struttura multilivello (da livelli nazionali a quelli comunali), con disposizioni che cambiano significativamente tra i Paesi, determinando complessivamente un basso grado di uniformità [8]. Le normative esistenti, oltretutto, sono basate su analisi qualitative di incendi avvenuti nel passato [9] o su test svolti in laboratorio [10], piuttosto che sulle previste condizioni future. Pertanto, le conoscenze riguardanti le dinamiche e i rischi d'incendio dovranno essere incrementate [8], a favore di un'analisi quantitativa.

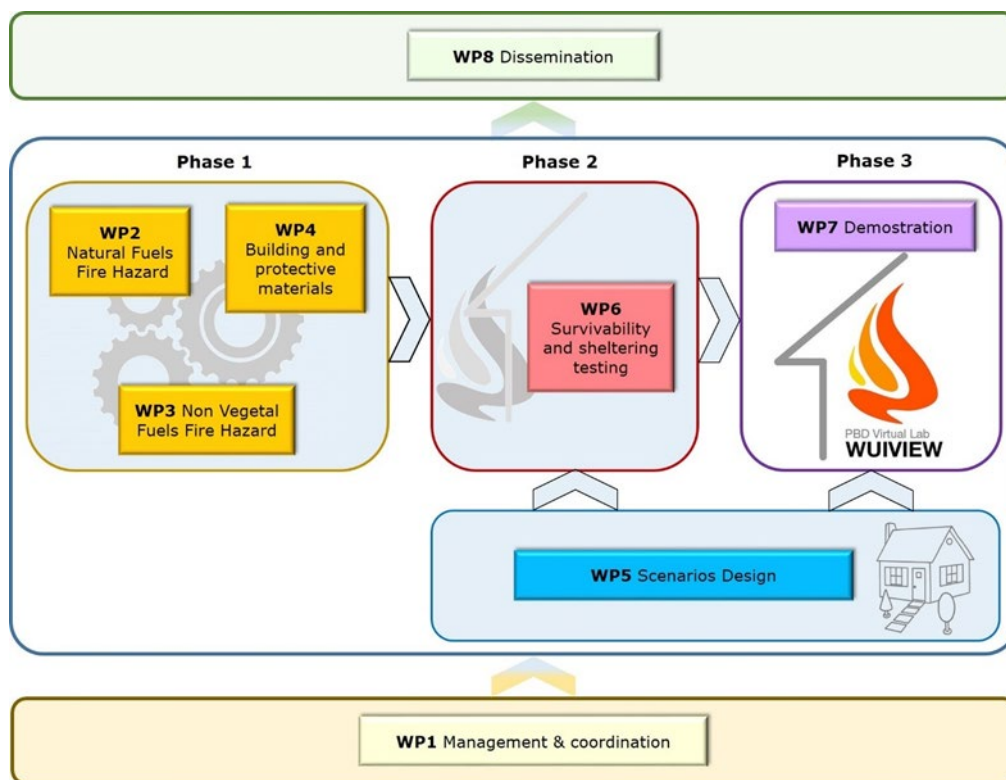
Nel 2019 è stato avviato il progetto WUIVIEW (Wildland-Urban Interface Virtual Essays Workbench) [11], ideato con lo scopo di sviluppare uno strumento innovativo di gestione dei rischi che, incentivando l'autoprotezione, aiuterà le comunità europee di interfaccia urbano-foresta ad adattarsi ad affrontare la nuova generazione di incendi boschivi. Il progetto mira a creare una guida per l'analisi con metodo prestazionale (e quindi quantitativo) dei rischi e delle vulnerabilità degli edifici e dei terreni localizzati nell'interfaccia urbano-foresta. WUIVIEW, terminato nei primi mesi del 2021, è stato finanziato dall'Union Civil Protection Mechanism (UCPM – Meccanismo di Protezione Civile dell'Unione Europea) e

portato avanti da un consorzio guidato dall'Universitat Politècnica de Catalunya (UPC - Spagna) con la partecipazione dell'Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI - Portogallo), del Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel (ARMINES - Francia), del Research Institutes of Sweden (RISE - Svezia) e dell'Università di Bologna (UNIBO – Italia).

2. METODOLOGIA

Il progetto è diviso in diversi work packages (pacchetti di lavoro) o WP, descritti nella Figura 1. La prima fase del progetto include tre WP, che si occupano della caratterizzazione dei pericoli dei combustibili di origine naturale (WP2) o artificiale (WP3) tipicamente presenti nella WUI, e dell'identificazione delle proprietà termiche dei materiali usati per la costruzione degli edifici (WP4). Successivamente avviene l'identificazione e la progettazione degli scenari tipici delle aree WUI (WP5), modellati poi nel WP6 e testati in termini di resistenza e di capacità di protezione dell'edificio. La metodologia e i risultati del progetto vengono mostrati nel WP7, mediante l'analisi di casi di studio reali. I WP1 e 8 includono rispettivamente il management e la coordinazione del progetto e la divulgazione dei risultati. I documenti riguardanti i WP possono essere consultati nella pagina web <https://wuiview.org/>.

La problematica degli incendi di interfaccia è intrinsecamente complessa poichè è caratterizzata da molteplici fenomeni che si verificano a diverse scale di osservazione: la macro-scala o scala paesaggistica, la meso-scala o scala dell'insediamento e la micro-scala, ovvero la zona di innesco circostante gli edifici. Il progetto si occupa di quest'ultima, in cui si verificano i fenomeni che minacciano la popolazione e le strutture. Questa scala è associata alle azioni preventive nelle immediate vicinanze di edifici, per garantire l'integrità della struttura e creare spazi autodifendibili [7].



2.1. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI E DEGLI ELEMENTI COMBUSTIBILI

Per la simulazione degli scenari identificati nel WP5 è necessario avere informazioni quantitative che riguardano la combustione degli elementi presenti nelle aree di micro-scala WUI. Questi elementi includono piante ornamentali, vegetazione bassa (ad esempio, siepi e prati incolti), recinzioni, mobili da esterno, altri materiali accumulati in garage o casette da giardino, o serbatoi GPL [12]. Nel caso di innesco di questi materiali combustibili, e di durata e intensità delle fiamme considerevoli, le conseguenze potrebbero avere un grave impatto sugli edifici circostanti [13].

Gli elementi combustibili sono stati divisi in due categorie: quelli naturali, analizzati nel WP2, e quelli artificiali, analizzati nel WP3. Per quanto concerne la prima categoria, ci sono poche informazioni riguardo alle dimensioni delle fiamme, all'energia rilasciata e al tempo di residenza della combustione delle piante ornamentali tipicamente presenti nella micro-scala. Per questo motivo sono stati svolti esperimenti in scala reale presso il laboratorio di ADAI in cui è stata studiata la combustione

di piante da siepe di quattro specie diverse (*Cupressus arizonica*, *Cupressocyparis leylandii*, *Prunus laurocerasus* e *Thuja occidentalis*). Da questi test è emerso che la specie più pericolosa tra le quattro è quella del *Cupressus arizonica*, mentre quella più resistente all'innesco è quella del *Prunus laurocerasus* [14].

La combustione degli elementi combustibili artificiali che si trovano comunemente all'interno di edifici (come mobili ed elettrodomestici) è stata ampiamente analizzata in test sia su piccola scala che in scala reale [15][16]. Mancano tuttavia dati quantitativi riguardo alla combustione di elementi artificiali e cumuli di svariati materiali combustibili che si trovano comunemente nei dintorni degli edifici delle zone WUI. Per colmare questa carenza di informazioni sono stati svolti quattro test su quattro diversi cumuli di combustibili. Il primo è stato svolto su un set di arredamenti da giardino (tavolo, sedie, ombrellone); il secondo su un cumulo contenente pallet in legno, materassi, scatole di cartone e secchi di vernice; il terzo contenente giochi da esterno, scatole colme di libri e carta e buste contenenti vestiti; e l'ultimo con solo secchi di vernice. Quelli che hanno

mostrato più elevati valori massimi di rilascio termico, con 2.2 MW e 2.5 MW, sono stati il set contenente gli arredi per esterni e quello contenente i pallet, il cartone, i materassi ed i secchi di vernice [17].

Sono stati inoltre creati due database, uno per i combustibili naturali e uno per quelli artificiali, che contengono dati quantitativi riguardanti la combustione rispettivamente di piante ornamentali e di diversi oggetti che si trovano tipicamente nelle aree WUI; questi database sono pubblici e possono essere scaricati dalla pagina web de progetto (<https://wuiview.org/>).

2.2. DINAMICHE E RISCHI ASSOCIATI AGLI INCENDI DI INTERFACCIA URBANO-FORESTA

Per l'identificazione dei rischi nelle zone della micro-scala WUI è necessario analizzare inoltre le possibili modalità di innesco dei combustibili. In questa zona sono state identificate quattro fasi, rappresentate in

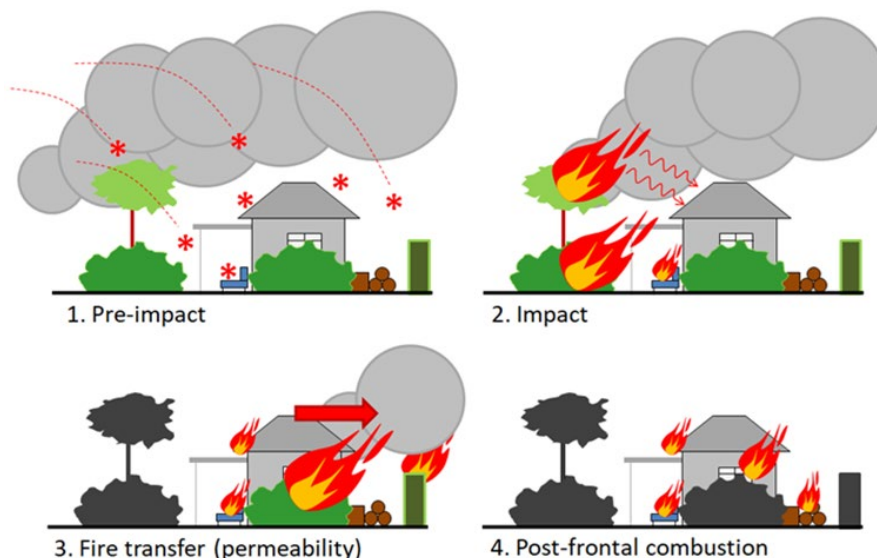


Figura 2. La prima fase è quella del *pre-impatto*, che si verifica quando il fronte dell'incendio boschivo non ha ancora raggiunto i lotti urbani, ma i tizzoni ardenti (materiali incandescenti come ramaglia, frammenti di corteccia e strobili) vengono spinti dal vento verso queste zone, causando il possibile innesco della vegetazione, degli altri materiali combustibili presenti o persino degli edifici stessi [9]. La fase in cui il fronte di fiamma raggiunge un lotto è quella dell'*impatto*, in cui possono verificarsi, insieme all'arrivo dei tizzoni ardenti, sia l'esposizione al calore radiante dell'incendio, sia il contatto diretto con le fiamme. Successivamente si sviluppa la fase di *propagazione* dell'incendio, in cui gli elementi già innescati propagano il fuoco, coinvolgendo gli altri combustibili presenti nelle vicinanze. La fase finale è denominata *combustione post frontale* ed è quella in cui tutti gli elementi innescati in una delle fasi precedenti continuano a bruciare, causando eventualmente ulteriori danni [7].

2.3. SELEZIONE DEGLI SCENARI

L'osservazione dei danni causati da incendi accaduti in passato, che hanno evidenziato le vulnerabilità degli edifici e dispiegato le modalità con cui un incendio può entrare in un edificio, ha permesso di identificare potenziali scenari per le zone di micro-scala WUI. Le vulnerabilità degli edifici che sono state accertate riguardano diversi elementi

costruttivi. Il tetto è uno degli elementi maggiormente esposti al fronte di fiamma, al suo calore radiante e all'arrivo di tizzoni ardenti. Tetti situati sotto rami tendono ad accumulare foglie e detriti, che possono essere facilmente innescati, coinvolgendo nella combustione anche la struttura stessa del tetto. Le tegole in laterizio sono molto frequenti nel Sud Europa e, pur essendo

resistenti al fuoco, possono creare fenditure nello spostarsi o nel rompersi, dando così modo ai tizzoni ardenti di provocare l'innescò della struttura (esempio in Figura 3). Poste ai bordi di un tetto, anche le grondaie sono zone di accumulo di detriti vegetali. In caso di innescò di questi materiali, le grondaie in PVC generalmente si deformano e possono cadere, causando l'innescò di materiali combustibili presenti a terra. Quelle in metallo, invece, più resistenti al calore, rimangono al loro posto, mantenendo le fiamme della combustione dei detriti a contatto con il tetto. Anche i sistemi di vetrate sono tra gli elementi di una struttura maggiormente esposti. Come



Figura 3: Tetto danneggiato dall'incendio di Funchal (Portogallo) nel 2016 [7]

Nelle aree di micro-scala WUI è comune la presenza di strutture secondarie semi-chiuse (quindi aperte almeno su un lato) come porticati, garage, casette da giardino o altri spazi dove possono essere accumulati oggetti di ogni tipo. Qualora questi spazi fossero adiacenti alla struttura dell'edificio principale e, in caso di combustione dei materiali presenti, il grande accumulo di calore creato dall'incendio potrebbe causare gravi danni all'involucro della struttura [7].

Un'altra problematica relativa alla propagazione dell'incendio in un lotto è causata dalla presenza di serbatoi di GPL (gas di petrolio liquefatto) fuori terra. Quando un serbatoio è esposto a fiamme provenienti da combustibili situati nelle sue vicinanze, questo si riscalda e la pressione al suo interno aumenta. Se la pressione del serbatoio raggiunge il valore massimo di esercizio, la

conseguenza dell'esposizione alle fiamme provenienti dal fronte dell'incendio o da altri combustibili circostanti, possono crearsi fessure o cedimenti delle lastre di vetro. In questo modo si creano aperture nell'involucro dell'edificio attraverso cui possono entrare tizzoni ardenti o fiamme che provocano l'innescò dei combustibili presenti all'interno dell'edificio, come mostrato in Figura 4. Altre aperture attraverso le quali tizzoni, fumo e fiamme possono entrare negli edifici sono le prese d'aria. Quelle più comuni si trovano sul tetto, mentre altre si trovano nei muri, spesso protette da coperture e griglie [7].



Figura 4: Vetrate rotte in Neos Voutzas-Mati (Grecia, 2018) a causa della combustione di un pino [7]

valvola di sicurezza si aprirà, rilasciando il GPL contenuto al suo interno, che si innescherà immediatamente, formando un jet fire che aumenterà il carico termico sul serbatoio stesso e sull'ambiente circostante. Se il serbatoio non viene raffreddato o l'incendio non viene estinto, potrebbe formarsi una BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) [12], ovvero un'esplosione dei vapori che si espandono a causa dell'ebollizione di un liquido.

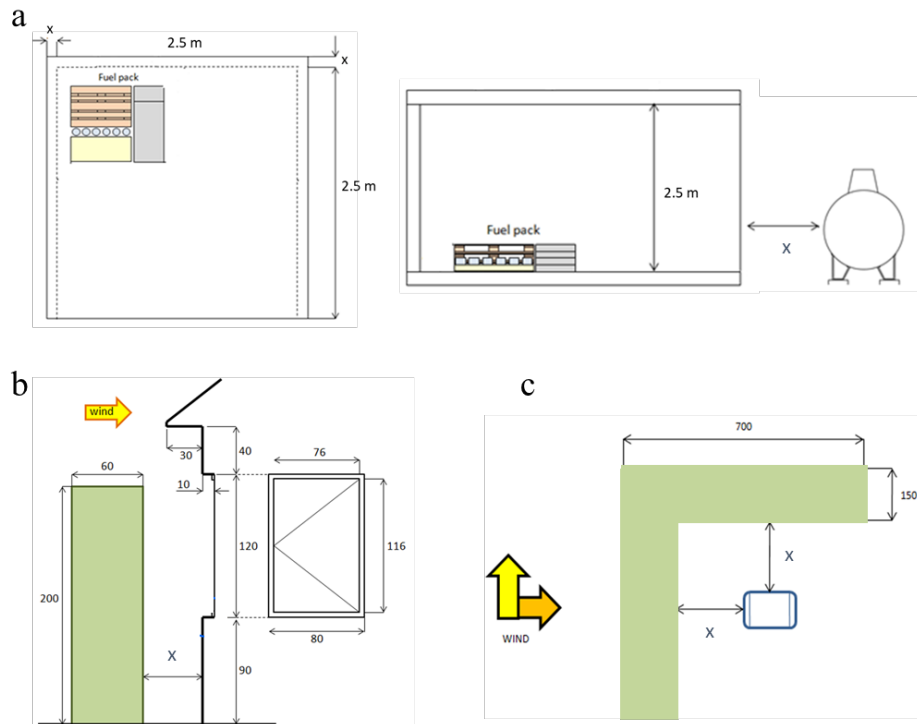


Figura 5: Esempi di scenari semplificati: (a) serbatoio GPL posto davanti ad una struttura in cemento semi-chiusa che contiene materiali combustibili; (b) siepe posizionata davanti a una finestra; (c) siepe vicina a un serbatoio GPL. La distanza tra la fonte dell'incendio e la struttura vulnerabile (x) può essere facilmente modificata [18]

Le problematiche appena descritte sono state riportate in una serie di scenari semplificati, che possono anche essere combinati tra loro per creare situazioni più complesse, come ad esempio gli effetti a catena. Alcuni esempi di questi scenari sono descritti nella Figura 5.

2.4. ANALISI DEGLI SCENARI CON METODO PRESTAZIONALE

Gli scenari appena descritti possono essere analizzati con un approccio prestazionale (Performance-Based Design o PBD) basato sul raggiungimento di obiettivi di sicurezza antincendio tramite l'analisi di scenari d'incendio e la valutazione quantitativa delle strategie progettuali designate al raggiungimento del livello di sicurezza previsto [19]. Questa metodologia viene soprattutto utilizzata per l'analisi delle conseguenze degli incendi all'interno di edifici. Organismi di regolamentazione, istituti di ricerca e professionisti stanno iniziando ad affrontare anche le sfide di sicurezza antincendio delle zone WUI con l'aiuto di questa metodologia. La National Fire Protection Agency (NFPA) negli Stati Uniti, ad esempio, consiglia di

considerare uno scenario di incendio proveniente dall'esterno per progetti che coinvolgono edifici situati nelle zone WUI [7].

Le tante variabili e i molteplici scenari delle zone WUI possono essere analizzati con l'aiuto di software di modellazione CFD (*Computational Fluid Dynamics*, fluidodinamica computazionale) come FDS (*Fire Dynamics Simulator*). Questo software non è adatto alla modellazione predittiva del comportamento del fuoco in tempo reale su scala paesaggistica, a causa dei suoi vincoli computazionali; può fornire invece informazioni riguardanti variabili chiave per la gestione del rischio (es. temperature ed esposizione al calore di persone e beni materiali, evoluzione dello strato di fumo, etc.) su scale più ridotte, come la micro-scala WUI. Questo approccio consente una grande flessibilità nella predisposizione degli scenari, dei materiali e dei tipi di incendio presenti nella micro-scala WUI, difficile da riprodurre in test sperimentali [7].

Gli scenari identificati nel WP5 sono stati analizzati con il metodo prestazionale nel WP6

[20]. Sono stati definiti criteri prestazionali (ad esempio, differenza di temperatura tra parte esposta e parte non esposta delle vetrate, capacità di carico di pareti in cemento, flusso termico incidente critico per i serbatoi GPL, etc.) e ogni scenario è stato modellato in FDS e quindi valutato in base alla rispondenza o meno ai criteri prestazionali.

Con il metodo prestazionale, oltre alle vulnerabilità strutturali, è possibile analizzare anche le capacità di protezione di un edificio nel caso in cui questo venga utilizzato come rifugio. In questo caso i criteri prestazionali si basano non solo sull'integrità della struttura, ma anche sull'esposizione delle persone occupanti l'edificio agli effetti dell'incendio, quali la concentrazione di prodotti tossici, le temperature e la densità del fumo. Inoltre, basandosi su questi criteri, è possibile analizzare il tempo disponibile per l'esodo, nel caso in cui un incendio approcci il lotto.

3. RISULTATI DEL PROGETTO

I risultati dei diversi scenari analizzati nel WP6 sono stati utilizzati per la creazione di due strumenti di autovalutazione per l'analisi qualitativa degli edifici nelle zone WUI,

entrambi in forma di questionario con un sistema a punteggio. Il primo, chiamato *Vulnerability Assessment Tool* o VAT, aiuta a valutare le vulnerabilità ad un incendio boschivo di un edificio localizzato in zone WUI. Il VAT è stato ideato seguendo il *fault tree* riportato in Figura 6, in cui gli eventi base (B) rappresentano le possibili cause degli eventi intermedi, che possono portare all'ingresso dell'incendio all'interno di un edificio. A ciascun evento intermedio è assegnato un punteggio (p) da 0 a 20, per cui, qualora gli eventi si verificassero singolarmente, la possibilità che si verifichi un incendio all'interno dell'edificio sarebbe la stessa, indipendentemente dalla causa. Maggiore è il numero di possibili eventi che possono causare danni all'edificio, più vulnerabile sarà la struttura, poiché maggiore sarà la probabilità di ingresso di tizzoni ardenti, fiamme o fumo. È stato fissato un valore massimo di FVI (*Fire Vulnerability Index*, ovvero indice di vulnerabilità al fuoco) pari a 100, risultante dalla somma dei cinque diversi possibili eventi intermedi. Pertanto, dopo aver compilato la checklist, ottenere un valore di FVI pari a 100 sarà segno di un lotto mal gestito, mentre un valore di FVI pari a 0 rifletterà una gestione ottimale.

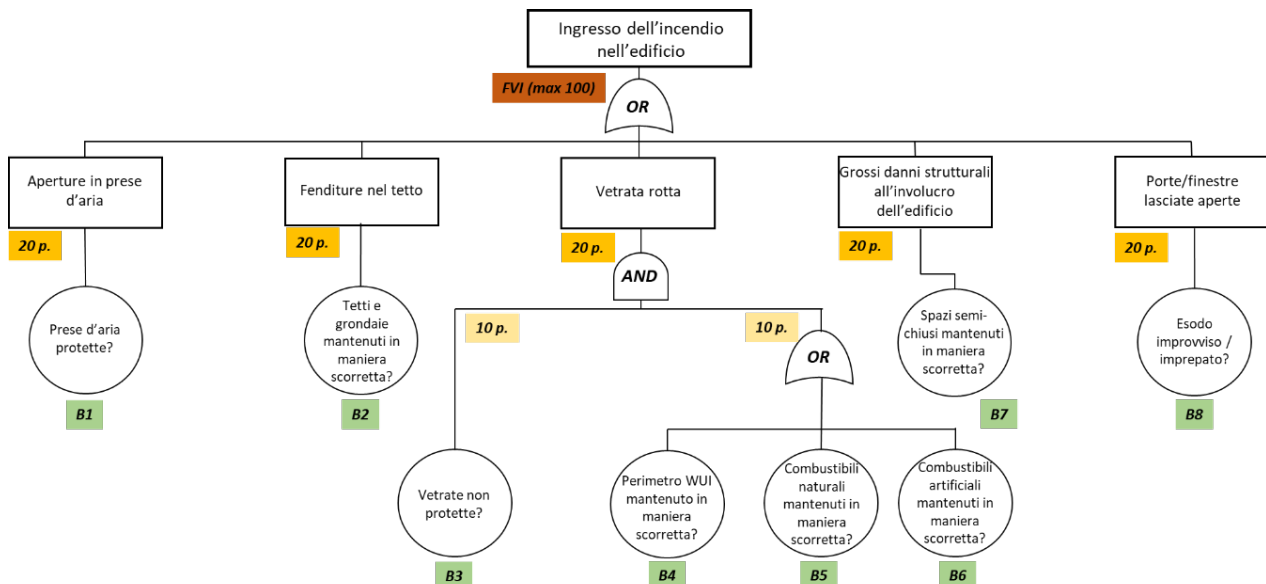


Figura 6: Struttura logica del VAT [20]

B3 Le vetrate sono protette in caso di esposizione ad un incendio?

- Le finestre sono spesso uno degli elementi di un edificio più esposti a una fonte di calore in un incendio boschivo. Vetrate rotte sono punti di ingresso per tizzoni ardenti, che possono innescare un incendio all'interno di un edificio.
- Le finestre variano notevolmente per dimensioni, materiali, telai, persiane, vetri e sistemi di apertura. È stato osservato che i doppi vetri, i vetri rinforzati, temperati e riflettenti sono più resistenti alle radiazioni rispetto ai vetri laminati a lastra singola.
- Se i vetri sono protetti, persiane o tapparelle assorbiranno parte dell'energia incidente, con conseguente minore assorbimento di energia da parte del vetro. Le persiane devono essere realizzate in materiale non combustibile.



Photo source: D. Caballero

ID	Domanda	SI	NO
B3.1	I sistemi di vetrate sono protetti (es. persiane, tapparelle) con materiali non combustibili?	0	5
B3.2	I sistemi di vetrate sono realizzati con doppi vetri o multistrato, o con vetro resistente al fuoco (es. temperato), con uno spessore di almeno 6 mm?	0	5
MAX = 10 punti			

Figura 7: Esempio di domande per l'evento B3 [20]

Il secondo strumento è quello della valutazione della capacità di protezione di un edificio, il *Sheltering Assessment Tool* o SAT, basato sulla logica del fault tree in Figura 8. I tre requisiti sono la resistenza della struttura, l'idoneità fisica e mentale degli abitanti e la loro preparazione/risposta all'incendio. Un edificio viene considerato adeguato alla

protezione dei suoi abitanti solo nel caso in cui tutte le risposte al questionario siano affermative. La resistenza della struttura dell'edificio viene considerata ottimale solo nel caso in cui il punteggio ottenuto nel VAT, quindi il *Fire Vulnerability Index* sia minore di 20.

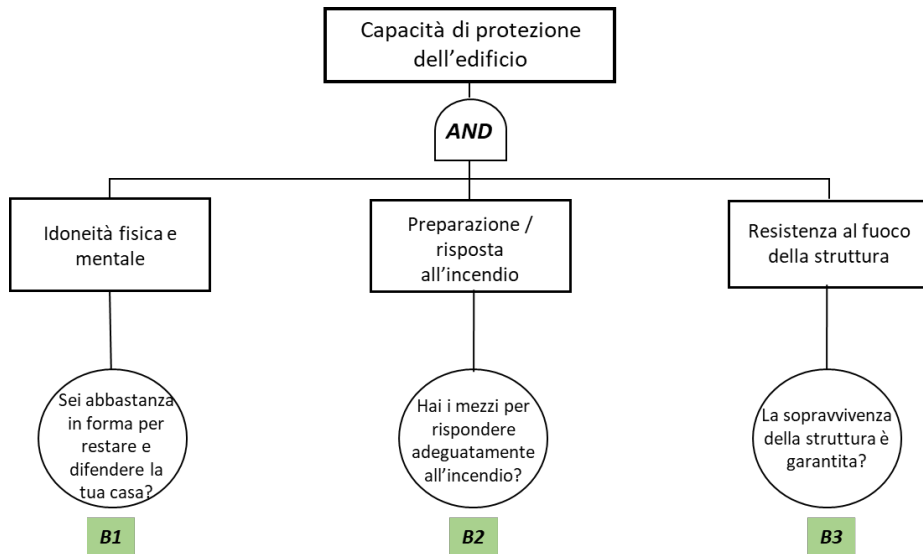


Figura 8: Struttura logica del SAT [20]

Un altro output derivato dall'analisi degli scenari del WP5 è una guida all'approccio prestazionale antincendio che può essere applicata a lotti e edifici (nuovi o esistenti) situati in aree WUI nella loro integrità, o solo per alcune loro parti. Questa guida è stata realizzata per quantificare i rischi e le vulnerabilità degli edifici considerando la loro capacità di protezione degli occupanti o di resistenza al passaggio di un incendio boschivo [21]. La guida segue l'iter dell'approccio prestazionale utilizzato per incendi all'interno di edifici, secondo cui devono essere (i) definiti la portata e gli obiettivi del progetto (es. mantenere l'integrità strutturale di un edificio); (ii) specificati i criteri prestazionali per la sicurezza degli occupanti e delle strutture; (iii) identificati gli scenari da analizzare, insieme alle caratteristiche dell'incendio, dell'ambiente circostante, dell'edificio e dei suoi occupanti; (iv) analizzati e valutati gli scenari scelti. Le particolarità delle aree WUI si notano soprattutto nella definizione degli scenari e delle caratteristiche da modellare. Dato il grande numero di possibili eventi, la guida suggerisce di identificare tre tipi di scenari diversi:

- Ad elevata frequenza, ma con conseguenze limitate, come ad esempio l'innesco di una siepe e la conseguente propagazione dell'incendio attraverso di essa, con condizioni meteorologiche

(temperatura, umidità, direzione e velocità del vento) nella media.

- A bassa frequenza, ma con gravi conseguenze, come il simultaneo innesco di molteplici punti di una siepe, con condizioni meteorologiche estreme (temperature elevate, umidità bassa, velocità del vento elevata e nella direzione più pericolosa).
- Problemi particolari che possono essere affrontati singolarmente, come la presenza di materiali combustibili posti vicino ad un serbatoio GPL, oppure cumuli di materiali combustibili in strutture semi-chiuse.

La valutazione degli scenari avviene determinando qualora il progetto soddisfi tutti i criteri prestazionali prestabiliti. La modellazione di questi scenari può essere svolta con uno strumento come FDS, che permette di simulare geometrie complesse per cui è richiesta una risoluzione spaziale dettagliata. L'uso di questi strumenti richiede una quantità significativa di informazioni relative all'edificio e all'incendio. Alcuni suggerimenti riguardanti queste informazioni possono essere consultati nella guida stessa.

La guida all'approccio prestazionale per le zone WUI, insieme agli strumenti di analisi qualitativa VAT e al SAT possono essere consultati sul sito <https://wuiview.org/>.

4. Applicazione a casi reali

Una volta stabilita la metodologia e identificate le problematiche e le vulnerabilità dei lotti e degli edifici delle zone WUI, sono stati analizzati quattro casi di studio reali (WP7): due in Spagna, uno in Svezia e uno in Portogallo. Gli edifici situati in Spagna e in Svezia sono prima stati valutati qualitativamente con il VAT e il SAT, ricevendo un FVI maggiore di 20; successivamente sono stati analizzati secondo il metodo prestazionale, per identificare le vulnerabilità ad un incendio. Gli scenari d'incendio sono stati scelti seguendo

le indicazioni della guida all'approccio prestazionale e poi modellati in FDS, come si può vedere dall'esempio in Figura 9. Per tutti gli edifici analizzati è risultato che un incendio potrebbe entrare attraverso le finestre i cui vetri si rompono, lasciando penetrare tizzoni ardenti, fiamme e fumo [22]. Pertanto, per ciascuno di questi edifici sono necessarie ulteriori misure per proteggere le finestre dal calore causato dall'incendio.



Figura 9: Modello FDS del caso di studio in Spagna, nella urbanizzazione di Entrepinos (Madrid) [22]

Il caso di studio portoghese consiste, invece, nell'analisi di un edificio destinato ad essere utilizzato come rifugio antincendio nella comunità di Moninhos Cimeiros, colpita dall'incendio di Pedrógão Grande nel giugno del 2017. In questo caso, poiché la proprietà è progettata per essere resistente al fuoco, lo studio si è concentrato sul momento in cui vengono superati i criteri di sostenibilità nei dintorni del rifugio, e quindi su quale sia il tempo disponibile per la popolazione per raggiungere il rifugio (ASET, *Available Safe Egress Time*). Per questo caso è stato testato un nuovo strumento che include GIS e FDS, con la collaborazione di E. Gissi del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. L'ASET è stato stimato in base al sopraggiungere del fronte dell'incendio al rifugio situato nella zona centrale dello spazio simulato in Figura 10, da cui si può notare che l'incendio sopraggiunge dopo circa 33 minuti. L'analisi di questo tipo di scenari è ancora in fase di studio, per cui l'ASET potrebbe essere calcolato anche in

base alla visibilità attraverso il fumo e al valore critico del calore radiante per la popolazione in procinto di raggiungere il rifugio. Occorre inoltre prevedere il tempo richiesto per l'esodo delle persone verso il rifugio, definito come RSET (*Required Safe Egress Time*), al fine di valutare se il rifugio può essere raggiunto in condizioni di sicurezza. Strumenti per questo calcolo continuano ad essere sviluppati [23], [24], [25], ma è necessario includere anche modelli d'incendio fisicamente basati come FDS [24].

Per questi casi deve ancora essere sviluppata una metodologia per la selezione degli scenari da analizzare [22], per cui possono essere utilizzati approcci probabilistici (ad esempio [26]), date le numerose variabili relative ai punti di innesco e alle condizioni ambientali e della vegetazione.

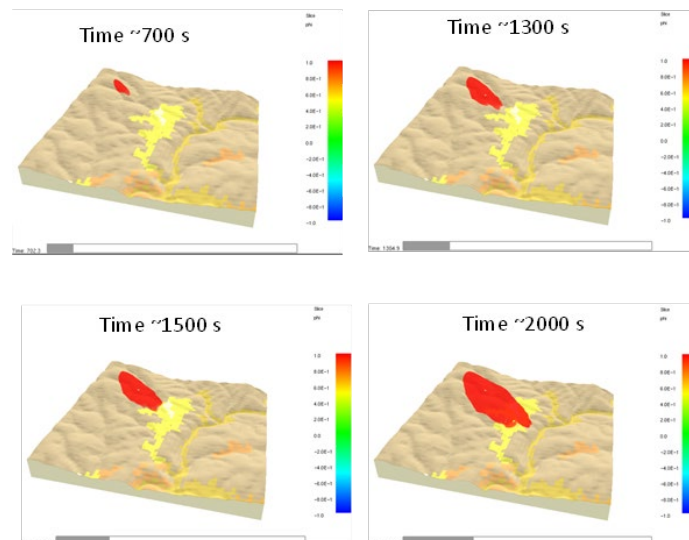


Figura 10: Area di espansione dell'incendio (in rosso) [22]

5. CONCLUSIONI

Il progetto WUIVIEW, finanziato dall'Union Civil Protection Mechanism (UCPM – Meccanismo di Protezione Civile dell'Unione Europea), è stato ideato con l'obiettivo di creare strumenti per l'analisi dei rischi e delle vulnerabilità delle zone WUI europee. Con una metodologia basata sull'analisi quantitativa con il metodo prestazionale sono stati creati tre strumenti, due di tipo qualitativo (VAT e SAT), che possono essere utilizzati sia da professionisti del campo che dalla popolazione di queste zone, e uno di tipo quantitativo, ossia la guida all'approccio prestazionale, mirato ad essere utilizzato da professionisti che si occupano di antincendio.

Per diventare strumenti operativi in grado di coprire tutti i tipi di aree WUI, il VAT e il SAT dovranno essere migliorati ed includere tutte queste realtà WUI. Attualmente sono state sviluppate due versioni, una con riferimento alle realtà mediterranee e una relativa alle realtà scandinave; inoltre, questi questionari potrebbero essere adattati ad altri tipi di strutture come, ad esempio, edifici pubblici o infrastrutture industriali. La metodologia prestazionale è stata applicata con successo a diverse realtà WUI per cui il principale obiettivo era l'integrità dell'edificio. È necessario un ulteriore sviluppo per gli approcci ASET/RSET (margini di sicurezza per la salvaguardia della vita) per affrontare l'analisi dei problemi di esodo/rifugio.

Il successo della riduzione del rischio di incendio alla micro-scala WUI nell'applicazione di questi strumenti comporta il coinvolgimento non solo di chi gestisce il rischio incendio, ma anche delle autorità locali che si occupano di prevenzione, dei comuni e, naturalmente, dei proprietari e dei residenti delle zone WUI.

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata parzialmente finanziata dall'European Union Civil Protection (Project GA 826522 WUIVIEW UCPM-2018-PP-AG) e dal Spanish Ministry of Economy and Competitiveness (progetto CTQ2017-85990-R, co-finanziato con fondi FEDER).

BIBLIOGRAFIA

- [1] European Environment Agency, Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe. Enhancing coherence of the knowledge base, policies and practices, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.
- [2] World Meteorological Organization (WMO), Unprecedented wildfires in the Arctic, (2019). <https://public.wmo.int/en/media/news/unprecedented-wildfires-arctic>.
- [3] D. De Rigo, G. Libertà, T. Houston Durrant, T. Artes Vivancos, J. San-Miguel-Ayanz, Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty, 2017. <https://doi.org/10.2760/13180>.
- [4] J. San-Miguel-Ayanz, T. Durrant, R. Boca, G. Libertà, A. Branco, D. De Rigo, D. Ferrari, P. Maianti, T. Artes Vivancos, H. Costa, F. Lana, Advance EFFIS report on Forest Fires in

- Europe, Middle East and North Africa 2019, *Jt. Res. Cent. EC.* (2020) 36.
<https://doi.org/10.2760/344684>.
- [5] Redazione Sardegna Live, Incendi in Sardegna: 1.500 sfollati, 20.000 ettari di terreno in fumo, (2021).
<https://www.sardegna-live.net/news/in-sardegna/304924/incendi-in-sardegna-1-500-sfollati-20-000-ettari-di-terreno-in-fumo> (accessed July 28, 2021).
- [6] S.E. Caton, R.S.P. Hakes, D.J. Gorham, A. Zhou, M.J. Gollner, Review of Pathways for Building Fire Spread in the Wildland Urban Interface Part I: Exposure Conditions, *Fire Technol.* 53 (2017) 429–473.
<https://doi.org/10.1007/s10694-016-0589-z>.
- [7] P. Vacca, D. Caballero, E. Pastor, E. Planas, WUI fire risk mitigation in Europe: A performance-based design approach at home-owner level, *J. Saf. Sci. Resil.* 1 (2020) 97–105.
<https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2020.08.001>.
- [8] E. Pastor, J.A. Muñoz, D. Caballero, A. Àgueda, F. Dalmau, E. Planas, Wildland-Urban Interface Fires in Spain: Summary of the Policy Framework and Recommendations for Improvement, *Fire Technol.* (2019).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10694-019-00883-z>.
- [9] R.S.P. Hakes, S.E. Caton, D.J. Gorham, M.J. Gollner, A Review of Pathways for Building Fire Spread in the Wildland Urban Interface Part II: Response of Components and Systems and Mitigation Strategies in the United States, *Fire Technol.* 53 (2017) 475–515.
<https://doi.org/10.1007/s10694-016-0601-7>.
- [10] A.D. Syphard, T.J. Brennan, J.E. Keeley, The importance of building construction materials relative to other factors affecting structure survival during wildfire, *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 21 (2017) 140–147.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.11.011>.
- [11] Wildland-Urban Interface Virtual Essays Workbench, (2019). <https://wuiview.org/>.
- [12] G.E. Scarponi, E. Pastor, E. Planas, V. Cozzani, Analysis of the impact of wildland-urban-interface fires on LPG domestic tanks, *Saf. Sci.* 124 (2020) 104588.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104588>.
- [13] E. Pastor, Direct Flame Contact, *Encycl. Wildfires Wildland-Urban Interface Fires.* (2019) 1–7. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_64-1.
- [14] L.M. Ribeiro, M. Almeida, J.A. Muñoz, Deliverable D2.1 - Report on real scale experiments, 2020.
https://wuiview.org/download/WUIVIEW_D2.1_F.pdf.
- [15] M.J. Hurley, D.T. Gottuk, J.J.R. Hall, K. Harada, E.D. Kuligowski, M. Puchovsky, J.L. Torero, J.J.M. Watts, W. CJ, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th ed., Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>.
- [16] National Fire Research Laboratory, Fire Calorimetry Database (FCD), (2020).
<https://doi.org/https://doi.org/10.18434/mds2-2314>.
- [17] P. Vacca, E. Planas, C. Mata, J.A. Muñoz, F. Heymes, E. Pastor, Experimental analysis of real-scale burning tests of artificial fuel packs at the Wildland-Urban Interface, 2021.
- [18] D. Caballero, J. Sjöström, Deliverable D5.1 - Inventory of pattern scenarios, 2019.
https://www.wuiview.org/download/WUIVIEW_D5.1_F.pdf.
- [19] Society of Fire Protection Engineers, *SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection*, Society of Fire Protection Engineers (SFPE), 2007.
- [20] P. Vacca, A. Àgueda, J.A. Muñoz, E. Planas, E. Pastor, F. Heymes, E. Ismael, R. Eyssette, V. Cozzani, G.E. Scarponi, Deliverable 6.1 - Recommendations on structure survivability and sheltering capacity, (2020) 1–95.
- [21] P. Vacca, E. Planas, Deliverable D7.1 PBD WUI-specific final guideline, 2021.
https://www.wuiview.org/download/D71_F_WUIVIEW_PBD_guideline.pdf.
- [22] P. Vacca, A. Àgueda, E. Planas, J. Sjöström, F. Plathner, E. Hallberg, L.M. Ribeiro, M. Almeida, D. Caballero, Deliverable D7.2 Report on case studies, 2021.
- [23] T.J. Cova, P.E. Dennison, T.H. Kim, M.A. Moritz, Setting Wildfire Evacuation Trigger Points Using Fire Spread Modeling and GIS, *Trans. GIS.* 9 (2005) 603–617.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2005.00237.x>.
- [24] J. Wahlqvist, E. Ronchi, S.M.V. Gwynne, M. Kinatered, G. Rein, H. Mitchell, N. Bénichou, C. Ma, A. Kimball, E. Kuligowski, The simulation of wildland-urban interface fire evacuation: The WUI-NITY platform, *Saf. Sci.* 136 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105145>.
- [25] A. Beloglazov, M. Almashor, E. Abebe, J. Richter, K.C.B. Steer, Simulation of wildfire evacuation with dynamic factors and model composition, *Simul. Model. Pract. Theory.* 60 (2016) 144–159.
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.10.002>.
- [26] C. Lautenberger, Mapping areas at elevated risk of large-scale structure loss using Monte Carlo simulation and wildland fire modeling, *Fire Saf. J.* 91 (2017) 768–775.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.014>.

FIRES AT THE WILDLAND-URBAN INTERFACE: THE WUIVIEW PROJECT

Author: Pascale Vacca, Fire Safety Engineer and Ph.D. student at CERTEC, UPC

Bio

Graduated from the International Master of Science in Fire Safety Engineering (IMFSE), she worked as a fire safety consultant for a company based in Belgium, where she mainly worked on prescriptive and performance-based design projects for buildings. She is currently a Ph.D. student at the Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) and is part of the research team at CERTEC, where she mainly works on fires at the Wildland-Urban Interface.

ABSTRACT

The WUIVIEW project aims at developing risk management tools that will help Wildland-Urban Interface (WUI) communities to adapt to face the new generation of wildfires. The different phases of the project consist of the characterization of the hazards posed by the different types of fuels present at the WUI, and the identification, design and modelling of WUI scenarios. Three different risk tools result from the project: two qualitative tools, in form of checklists, and a quantitative one, which is a specific WUI Performance-Based Design (PBD) guideline.

1. INTRODUCTION

Wildfires are an integral part of forest dynamics in many ecosystems, where they are an essential element of forest renewal. Climate change is expected to influence wildfire regimes and risk: an increase in frequency and intensity of droughts and heat waves has been observed as a consequence of global warming, which causes the northward expansion of fire-prone areas as well as longer fire seasons in areas that are already fire-prone [1]. An example of this are the unprecedented Arctic wildfires of June 2019, which released the same amount of CO₂ into the atmosphere as the total of arctic wildfires in the same month from 2010 to 2018 [2]. In Europe, Portugal, Spain, Italy, Greece

and France account for around 85% of the total burnt area per year [3], and in 2020 Italy was the most affected European country for number of fires, and the fourth in terms of burnt area (53.807 ha) [4]. The largest fires occurred in Sicily and Sardinia. Halfway through the 2021 wildfire season, the damages are already substantial: a fire that burned more than 20.000 ha (close to 40% of the total burned area in the previous year) in the province of Oristano (Sardinia) in July. Around 1500 people had to evacuate their homes, many of which were damaged in some way by the fire, and many farms were destroyed and their animals killed [5].

It has been observed that wildfires that reach the border between the wildland and urban areas, defined as the Wildland-Urban Interface, have rapidly expanded in frequency and severity over the past few decades. The number of structures lost per year has grown significantly also due to the increased construction in rural areas, which is projected to grow in the future [6]. The consequences of these fires, may they be economic, social or environmental, are therefore also predicted to escalate.

WUI fires are also posing great management challenges in terms of civil protection and fire mitigation, as firefighters' capacities are often exceeded due to the need of a simultaneous response to wildfire suppression, community evacuation, and structure protection [7]. If the number of burning and vulnerable homes overwhelms the local fire protection capability, fire protection effectiveness is reduced and many homes are left unprotected [6]. Self-protection has thus become a growing necessity, and therefore, in the years to come, the focus must be placed on the creation of fire-adapted communities, which can safely co-exist with wildfires [7].

Wildfires that have reached the WUI, such as the one mentioned above, the one in Greece in 2018 (101 deaths and 998 destroyed buildings) or the one in Portugal in 2017 (65 deaths and 457 destroyed buildings) [7], have highlighted the need for a common strategy between European countries for the protection and prevention of this type of events. As of

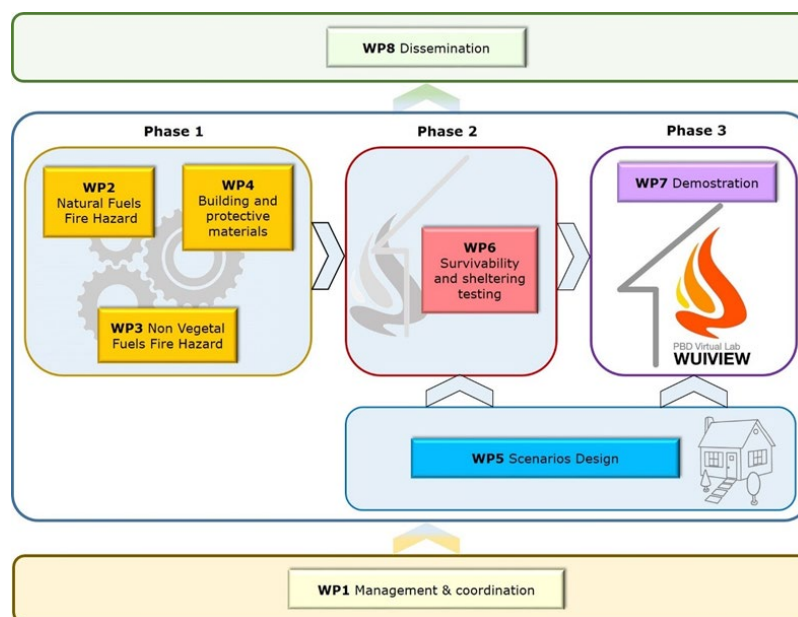
today, the European Union as a whole, and the Member States in particular, are belatedly articulating new and appropriate regulations and implementing policies for the protection of WUI areas against wildfires. In addition, current WUI national safety management policies are highly intricate involving a complicated multi-level structure (i.e. from national to municipality level), with provisions differing significantly between countries, and with an overall low degree of compliance [8]. Current regulations are, moreover, based on the qualitative analysis of past events [9] or on results from laboratory experiments [10], rather than on predicted future conditions. The knowledge base on WUI fire behaviour and risk at community scale must therefore be improved [8], in favour of a quantitative analysis.

The WUIVIEW (Wildland-Urban Interface Virtual Essays Workbench) [11] project started in 2019 and was conceived with the aim of developing an innovative risk management tool that, by encouraging self-protection, will help European WUI communities to adapt to face the new generation of wildfires. The objective of the project is to create a Performance-Based Design (PBD) guideline for the quantitative analysis of the risks and vulnerabilities of buildings and properties located at the WUI. WUIVIEW, which

concluded in the early months of 2021, was funded by the European Union Civil Protection Mechanism (UCPM) and carried out by a consortium coordinated by the Universitat Politècnica de Catalunya (UPC – Spain), with the involvement of the Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI - Portugal), the Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel (ARMINES - France), the Research Institutes of Sweden (RISE - Sweden), and the Università di Bologna (UNIBO – Italy).

2. METHODOLOGY

The project is divided into several work packages (WPs), described in Figure 1. The first phase includes three WPs, which consist of the characterization of fire hazards of natural (WP2) and non-natural (artificial) fuels (WP3) present at the WUI, along with the identification of building materials typically used for construction (WP4). WUI scenarios are then identified and designed in WP5, and modelled and analysed in WP6. The methodology is demonstrated in WP7 through the analysis of real case studies. WP1 and 8 include respectively the management and coordination of the project and the dissemination of the results. The documents regarding the WPs can be found in the project's webpage <https://wuiview.org/>.



The WUI fire problem is inherently complex, as it is characterized by the interaction of multiple phenomena of diverse nature occurring at different observation scales: the macroscale or landscape scale, the mesoscale or settlement scale and the microscale or homeowner scale. The project focuses on the latter, where the specific phenomena threatening people and dwellings take place. This scale is associated with preventive actions at the immediate surroundings of houses to guarantee structure integrity and create self-defensible spaces [7].

2.1. MATERIAL AND FUEL CHARACTERIZATION

Quantitative information on the combustion of WUI microscale fuels for the simulation of the scenarios identified in WP5 is needed. These fuels include ornamental vegetation (e.g. hedgerows), ground fuels, fences, outdoor furniture, fuel packs in garages or garden sheds, or LPG tanks [12]. In case of ignition of these fuels, and provided flames duration and intensity are significant enough, consequences for nearby structures might have a severe impact [13].

Residential fuels can be divided into two categories: natural, analysed in WP2, and non-natural, analysed in WP3. When it comes to the first category, limited information is available on flame heights, energy released and residence time related to the combustion of ornamental vegetation present at the microscale. For this reason, real-scale experiments have been performed in the Forest Fire Research Laboratory of ADAI to study the combustion of four species used in garden hedges (*Cupressus arizonica*, *Cupressocyparis leylandii*, *Prunus laurocerasus* e *Thuja occidentalis*). The results show *Cupressus arizonica* to be the most combustible specie of the four, while *Prunus laurocerasus* is the one with the lowest ignitability [14].

The burning behaviour of non-natural fuels that can be commonly found indoor (e.g. pieces of furniture and small appliances) has been extensively analysed in small- and real-scale tests [15][16]. There is however a lack of

quantitative data on the burning behaviour of artificial fuels and fuel packs that are frequently located in the surroundings of WUI structures. Four real-scale tests have therefore been performed on four different fuel packs. The first fuel pack consisted of a set of outdoor furniture (table, chairs, parasol); the second one of pallets, cardboard sheets, paint buckets and foam mats; the third of outdoor children toys, bags with clothes and boxes with paper and books; and the last one of only paint buckets. The fuel packs that showed higher peak Heat Release Rate (HRR) values, with respectively 2.2 MW and 2.5 MW, are the one containing garden furniture and the one with pallets, cardboard, paint and foam mats [17].

Two databases have also been created, one for natural and the other for non-natural fuels, which contain quantitative data on the burning behaviour of, respectively, ornamental vegetation and artificial fuels present at the WUI. These databases are public and can be downloaded from the project's webpage (<https://wuiview.org/>).

2.2. DYNAMICS AND RISKS ASSOCIATED WITH WUI FIRES

To appropriately analyse WUI microscale fire risks, ignition pathways at the WUI microscale must be investigated. Four different fire exposure phases have been identified, as shown in Figure 2. The first phase is the *pre-impact*, when the wildfire front has not yet reached the property in the settlement, but firebrands (pieces of burning or glowing wood or other materials) can be driven onto the property by the wind, where they are able to ignite vegetation or other combustible materials, and even buildings [9]. The phase in which a flame front reaches a property is named *impact*, where both radiant exposure and direct flame contact can occur, along with the arrival of firebrands. Fire propagation through the elements on a property will occur during the *fire transfer phase*. The final phase is the *post-frontal combustion*, in which all the items that ignited in any of the previous phases continue burning and can eventually cause further damage [7].

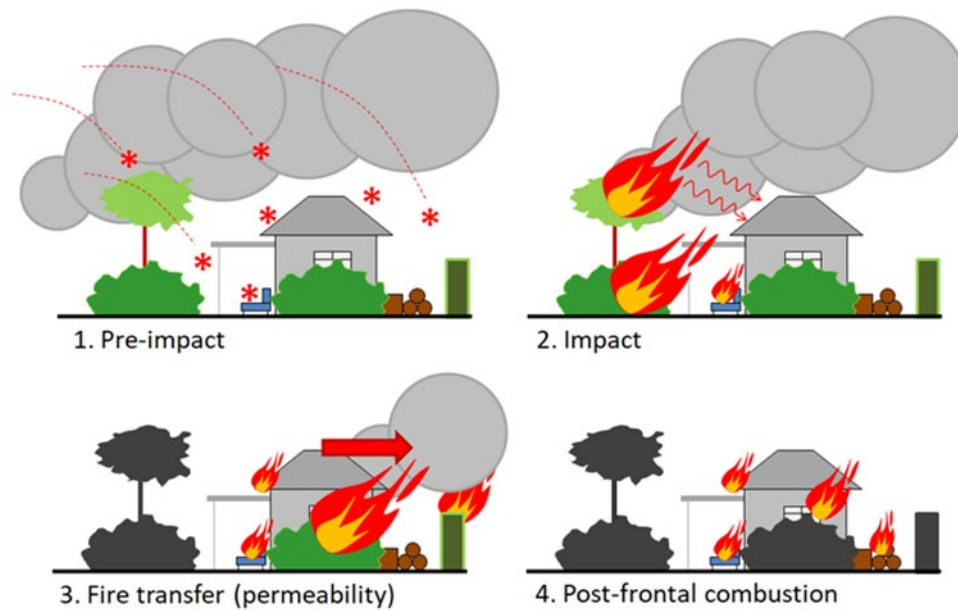


Figure 2: Fire exposure phases of WUI areas [18]

Potential scenarios for WUI microscale properties have been identified according to observations from damages caused by past events, which highlighted building vulnerabilities and therefore pathways through which a fire could enter a building. Several building sub-system vulnerabilities have been identified. One of the structural components that is the most exposed to an incoming flame front, its radiation and the landing of firebrands is the roof of a building. Roofs located under overhanging tree branches tend to accumulate fine fuels that can easily be ignited, entailing the involvement of the roof as well. Clay tiles are very frequent in Southern Europe, and although they are fire-resistant, they may break or displace, creating openings through which firebrands can enter and cause the ignition of the roof structure (see example in Figure 3). Located beneath the hedge of a roof, also gutters accumulate vegetal debris.

In case of their ignition, PVC gutters generally melt, deform and eventually fall, causing the ignition of fuels located on the ground. Metal gutters have a better resistance to the effect of radiation or flame contact, thus keeping the burning debris close to the eave's fringe and easing the involvement of external elements. Along with the roof, glazing systems are frequently the most exposed elements of a structure. Cracking or collapsing of window panes is observed as a consequence of flame impingement or heat exposure coming from the wildfire front or from close objects or vegetation previously ignited. Once the window has failed, flying embers and flames can enter the structure and cause the ignition of the inside elements, as shown in Figure 4. Other openings through which firebrands smoke and flames can enter a building are vents. Most common vents are located on the roof, while others are found as part of the wall siding, frequently protected with screens and grilles [7].



Figure 3: Roof damaged during the fire in Funchal (Portugal) in 2016 [7]



Figure 4: Broken windows in Neos Voutzas-Mati (Greece, 2018) due to the combustion of a pine tree [7]

At the WUI microscale, secondary semi-confined structures such as sheds, garages, or other types of storage areas, which are populated with many different non-natural fuels, are common. If one of these secondary structures is connected to the main buildings and the elements present in these areas are ignited, the great heat build-up created by the fire could cause great damage to the main structure's envelope [7]. Another issue related to the fire spread on a property is caused by the presence of aboveground domestic LPG (liquefied petroleum gas) tanks. When these tanks are exposed to flames coming from fuels located very near, they heat up and the pressure will increase. If the tank pressure

reaches the Pressure Relief Valve (PRV) set point, this will open, releasing LPG that will immediately ignite forming a jet fire. The jet fire will hence worsen the heat load to the tank and its surroundings. If no measure is taken in order to cool down the tank and/or extinguish the fire, the tank may fail, possibly leading to a BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) [12].

These vulnerabilities have been used as a baseline for the definition and design of pattern scenarios, which can also be combined to create more complex situation, such as chained events. Examples of these scenarios are described in Figure 5.

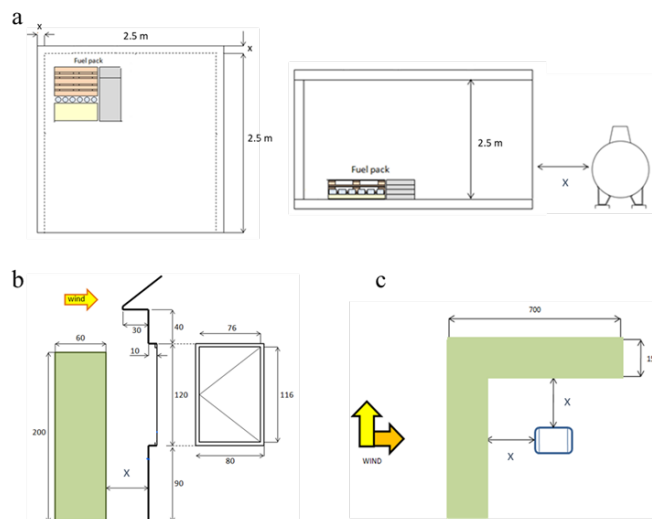


Figure 5: Examples of pattern scenarios: (a) LPG tank placed in front of a concrete semi-confined space containing a fuel pack; (b) hedge placed in front of a window; (c) hedge placed close to an LPG tank. The distance between the fire source and the vulnerable element (x) can be easily modified [18]

2.4. SCENARIO ANALYSIS WITH A PBD METHODOLOGY

The scenarios described above can be analysed with a PBD approach, based on meeting fire safety objectives through the analysis of fire scenarios and on the quantitative assessment of designs to determine whether they provide the intended level of safety [19]. This methodology is significantly applied to face fire safety challenges in buildings. When it comes to the WUI, regulatory bodies, research institutions and practitioners are starting to address its fire safety challenges with the aid of PBD methods. In the USA for example, the National Fire Protection Agency (NFPA) has recommended considering a design fire scenario of an outside fire exposure for PBD projects involving WUI structures [7].

The many variables and thus scenarios WUI problems present can be analysed with the help of CFD (Computational Fluid Dynamics) modelling tools such as FDS (Fire Dynamics Simulator). This tool is unsuitable for real-time predictive fire behaviour modelling at a landscape scale due to its computational constraints, but it can provide useful information on key variables for risk management (e.g. temperatures and heat exposure on people and assets, evolution of the smoke layer, etc.) at smaller scales, such as the WUI microscale. FDS offers great flexibility in the definition of different configurations, materials and fire loads present at the WUI microscale, which is otherwise very difficult to achieve in experimental tests [7].

The scenarios identified in WP5 have been analysed with a PBD approach in WP6 [20]. Performance criteria (e.g. temperature differences for glazing systems, load-bearing capacity of concrete walls, critical incident heat flux for LPG tanks, etc.) were defined and

each scenario was modelled in FDS and then evaluated by determining if the performance criteria were met.

A PBD approach can not only be applied to identify structural vulnerabilities, but also to analyse the sheltering capacity of a building. In this case, performance criteria must be set not only for structure integrity, but also for occupant's exposure to fire and smoke hazards, such as the thermal, toxic and visibility conditions. Based on these criteria it is also possible to identify the ASET (Available Safe Egress Time).

3. Project results

The results of the different scenarios analysed in WP6 have been used to create two self-evaluation tools for the qualitative analysis of WUI structures, both in checklist form with a scoring system. The first one is the *Vulnerability Assessment Tool* or VAT, which helps to evaluate the vulnerabilities of a structure to a wildfire that reaches the WUI. The VAT has been created following the structure of the fault tree depicted in Figure 6, in which the basic events (B) represent the possible causes of the intermediate ones, which can lead to the fire entering a building. A score (p) between 0 and 20 is assigned to each intermediate event; therefore, should these events occur individually, the chance of having fire inside a structure is the same, no matter the cause. The larger the number of possible events leading to gaps or openings, the more vulnerable the structure will be, as the probability of ember, flames or smoke entrance will be higher. A maximum value of FVI (Fire Vulnerability Index) of 100 was set, resulting from the sum of the five different possible causes. Therefore, after going through the checklist, obtaining a FVI value of 100 will be a sign of very poorly managed property, whereas a FVI value of 0 will reflect an optimum management [20].

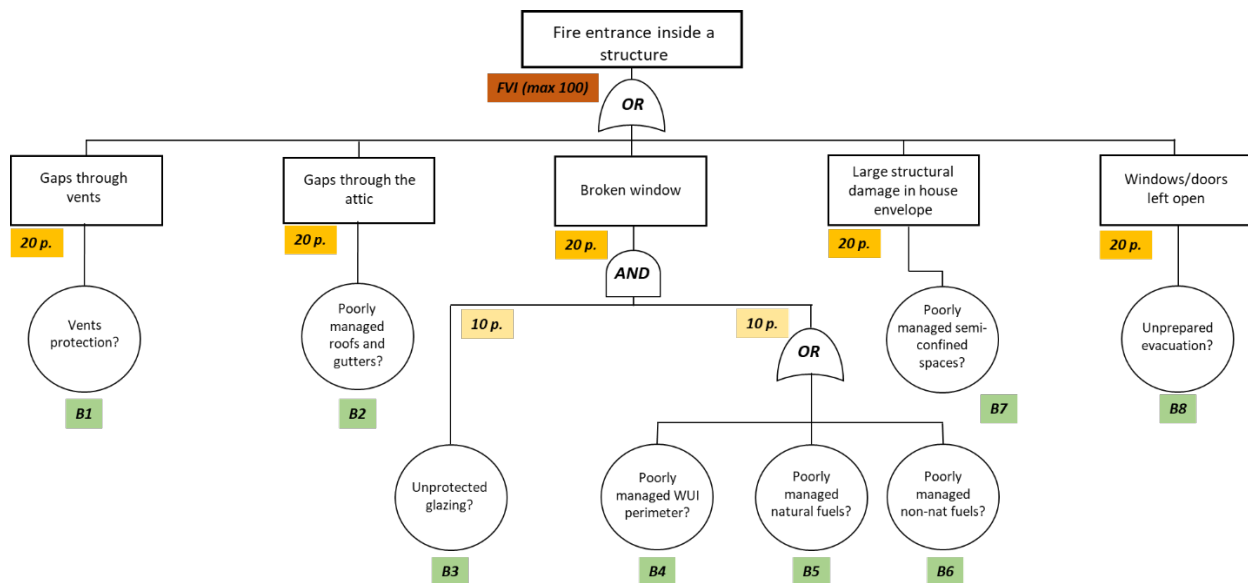


Figure 6: VAT logical structure [20]

B3: Are your glazing systems protected in case of fire exposure?

- Windows are frequently one of the most exposed elements in a house to a source of heat in a forest fire, together with roofing. Broken windows and glazing systems are entry points for flying embers, potentially triggering ignition inside the house.
- Windows vary greatly in size, materials, framing, casement, glazing and opening systems. It is observed that double-glazing, reinforced glass, tempered glass and reflective glass are more resistant to radiation than laminated single pane glasses.
- If glasses are protected, screens/blinds or shutters will absorb some of the incident energy, resulting in less energy being absorbed by the glass. Shutters should be made of non-combustible material (solid core wood or metal, no PVC).



Photo source: D. Caballero

ID	Question	YES	NO
B3.1	Do you have protection for all your windows/glazing systems (i.e. shutters, blinds) made of non-combustible materials (solid core wood fire-resistant, metal like aluminium)?	0	5
B3.2	Are your glazing systems double or multi-paned or made of fire-resistant tested material (e.g. tempered glass) and thickness equal or larger than 6mm?	0	5

MAX = 10 points

Figure 7: Example of the questions asked for event B3 [20]

The second tool is the one for the evaluations of a building's sheltering capacity, the *Sheltering Assessment Tool* or SAT, based on

the structure of the fault tree in Figure 8. The three requirements are structure endurance, physical and mental fitness and

preparedness/response of the homeowners. For a successful sheltering, the assessment of three blocks of questions related to each requirement has to be affirmative, i.e. if any of these requirements cannot be reached, sheltering will most likely be an unreliable option. The structure's endurance is

considered optimal only if the score obtained from the VAT, the FVI, is lower than 20.

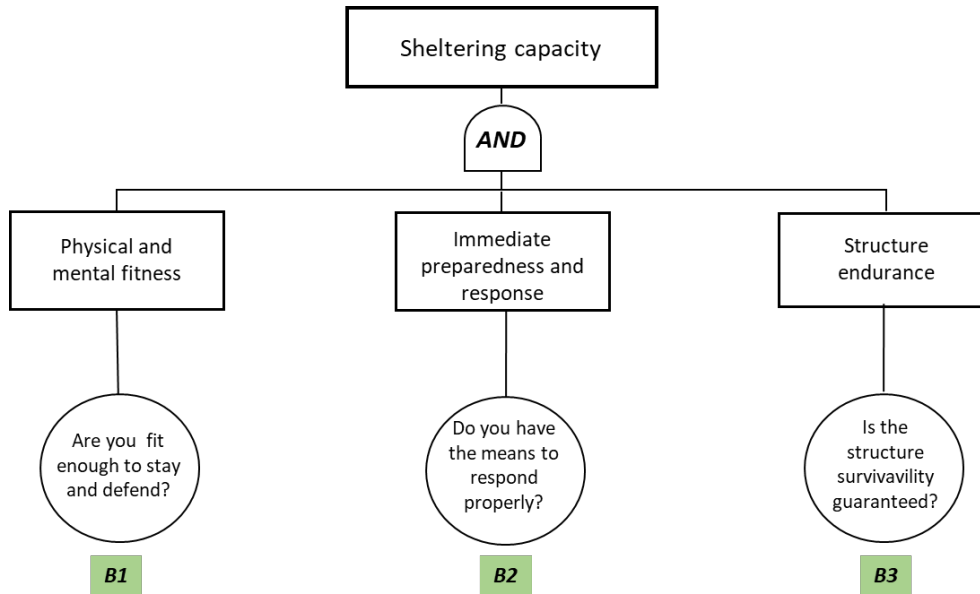


Figure 8: SAT logical structure [20]

Another output derived from the analysis of the scenarios of WP5 is the WUI specific PDB guideline, which can be applied to both new and existing buildings in their totality, or to their sub-systems. This guideline has been developed to quantify hazards and vulnerabilities of buildings taking in mind their sheltering capacity or just their ability to withstand the passing of a wildfire [21]. It follows the classic PDB process, which are: (i) the definition of the scope, goals and objectives of the project (i.e. structural integrity); (ii) the development of performance criteria for life and structural safety; (iii) the development of fire scenarios, design fires and trial designs; (iv) the evaluation of the trial designs. WUI specificities are especially highlighted during the development of the scenarios and the design fires. A way to reduce the scenario populations is also suggested by identifying three types of scenarios:

- Those that happen with high-frequency and low-consequences, such as the ignition of a hedgerow in one point with

fire spread through the hedge, with average environmental conditions (i.e. temperature, wind direction and speed, humidity).

- Those with low-frequency and high-consequences, such as the ignition of a hedgerow in multiple points, with extreme environmental conditions (i.e. high temperatures, low humidity, worst-case wind speed and direction).
- Special problems that can be addressed individually, such as the presence of combustible items close to a LPG tank or the storing of fuel packs in semi-confined spaces.

The evaluation of the trial designs involves determining if a design meets all of the set performance criteria. Modelling tools such as FDS can be used to simulate complex geometries where a more detailed spatial resolution is required. The use of these tools requires a significant amount of information related to the building and the fire, some of which are suggested in the guideline.

The WUI specific PBD guideline, along with the VAT and SAT, can be found on the website <https://wuiview.org/>.

4. REAL CASE STUDIES

Four different real case studies have been analysed in WP7 once the methodology and the hazards and vulnerabilities of properties located at the WUI had been established: two located in Spain, one in Sweden and one in Portugal. The properties located in Spain and Sweden were firstly evaluated qualitatively with the VAT and SAT, and they all scored an

FVI higher than 20. They were then analysed with the PBD methodology, to identify their vulnerabilities in a quantitative way. The fire scenarios were chosen by following the suggestions of the guideline, and were then simulated with FDS, as can be seen in the example in Figure 9. The results for all buildings indicated that the fire could enter through the windows, since the panes will break and creating openings for firebrands, flames and smoke [22]. Therefore, additional measures must be taken to protect the windows of each of these buildings.



Figure 9: FDS model for the case study in the Entrepinos community in Madrid, Spain [22]

The Portuguese case study consists of the analysis of a structure that is intended to be used as a community fire shelter and is located in the Moninhos Cimeiros parish council, which was affected by the large Pedrógão Grande wildfire occurred in June 2017. Since the property of this case study is already designed to be fire resistant, the study focuses on the time at which tenability criteria are exceeded in the surroundings of the shelter, and thus on identifying the ASET. A new toolchain with GIS tools and wildfire functionalities from FDS was tested in collaboration with E. Gissi from the Fire Brigade of Savona (Italy). For this case, the ASET was estimated based on the arrival of the fire front to the shelter, located in the middle of the simulated area in Figure 10. As can be seen from the figure, the fire will reach the shelter after about 33 minutes. The analysis of these types of scenarios is a work-

in-progress, and the ASET could be calculated also based on the visibility levels and on the critical radiant heat flux around the area where the evacuees are located. The time needed by the population to reach the shelter, thus the RSET (Required Safe Egress Time), must also be predicted in order to evaluate if the shelter can be reached in safe conditions. Tools for this prediction have been and continue to be developed [23],[24],[25], however, more work is needed on tools that include physics-based fire models such as FDS [24].

A methodology for scenario selection must also be established [22]. Probabilistic approaches (e.g. [26]) can be used, given the many variables when it comes to ignition points and environmental and fuel conditions.

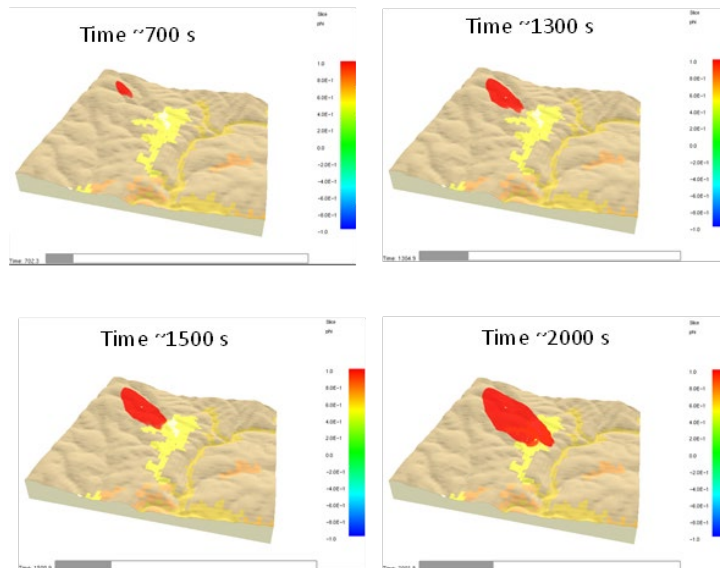


Figure 10: Burned area at different times (in red) [22]

5. CONCLUSIONS

The WUIVIEW project, funded by the European Union Civil Protection Mechanism (UCPM), was conceived with the aim of developing tools for the analysis of the risks and vulnerabilities of European WUI areas. Three tools have been created that are based on the findings of a quantitative analysis: two qualitative tools (VAT and SAT), which can be used by fire safety professionals as well as by homeowners, and a quantitative tool, the WUI specific PBD guideline, aimed at fire safety practitioners.

To become an operational tool covering all sorts of WUI assets, checklists have to be improved to include all types of WUI realities. At present, two versions have been developed, one covering Mediterranean realities and the other covering Scandinavia. In addition, the checklists could be adapted to other types of structures such as public buildings and industrial infrastructure. The PBD methodology has been successfully applied to different WUI realities with mainly structure survivability objectives. Further development is needed for ASET/RSET approaches to deal with the analysis of the evacuation/sheltering problem.

The success of reducing risk at the WUI microscale by applying these tools entails the engagement of not only fire risk managers, but

also local civil protection and fire prevention authorities, municipalities, and, of course, homeowners and residents of the WUI.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was partially funded by the European Union Civil Protection (Project GA 826522 WUIVIEW UCPM-2018-PP-AG), the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness (Project CTQ2017-85990-R , co-financed with FEDER funds).

REFERENCES

- [1] European Environment Agency, Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe. Enhancing coherence of the knowledge base, policies and practices, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.
- [2] World Meteorological Organization (WMO), Unprecedented wildfires in the Arctic, (2019). <https://public.wmo.int/en/media/news/unprecedented-wildfires-arctic>.
- [3] D. De Rigo, G. Libertà, T. Houston Durrant, T. Artes Vivancos, J. San-Miguel-Ayanz, Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty, 2017. <https://doi.org/10.2760/13180>.
- [4] J. San-Miguel-Ayanz, T. Durrant, R. Boca, G. Libertà, A. Branco, D. De Rigo, D. Ferrari, P. Maianti, T. Artes Vivancos, H. Costa, F. Lana, Advance EFFIS report on Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2019, Jt. Res. Cent. EC. (2020) 36. <https://doi.org/10.2760/344684>.

- [5] Redazione Sardegna Live, Incendi in Sardegna: 1.500 sfollati, 20.000 ettari di terreno in fumo, (2021). <https://www.sardegna-live.net/news/in-sardegna/304924/incendi-in-sardegna-1-500-sfollati-20-000-ettari-di-terreno-in-fumo> (accessed July 28, 2021).
- [6] S.E. Caton, R.S.P. Hakes, D.J. Gorham, A. Zhou, M.J. Gollner, Review of Pathways for Building Fire Spread in the Wildland Urban Interface Part I: Exposure Conditions, *Fire Technol.* 53 (2017) 429–473. <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0589-z>.
- [7] P. Vacca, D. Caballero, E. Pastor, E. Planas, WUI fire risk mitigation in Europe: A performance-based design approach at home-owner level, *J. Saf. Sci. Resil.* 1 (2020) 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2020.08.001>.
- [8] E. Pastor, J.A. Muñoz, D. Caballero, A. Àgueda, F. Dalmau, E. Planas, Wildland-Urban Interface Fires in Spain: Summary of the Policy Framework and Recommendations for Improvement, *Fire Technol.* (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10694-019-00883-z>.
- [9] R.S.P. Hakes, S.E. Caton, D.J. Gorham, M.J. Gollner, A Review of Pathways for Building Fire Spread in the Wildland Urban Interface Part II: Response of Components and Systems and Mitigation Strategies in the United States, *Fire Technol.* 53 (2017) 475–515. <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0601-7>.
- [10] A.D. Syphard, T.J. Brennan, J.E. Keeley, The importance of building construction materials relative to other factors affecting structure survival during wildfire, *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 21 (2017) 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.11.011>.
- [11] Wildland-Urban Interface Virtual Essays Workbench, (2019). <https://wuiview.org/>.
- [12] G.E. Scarponi, E. Pastor, E. Planas, V. Cozzani, Analysis of the impact of wildland-urban-interface fires on LPG domestic tanks, *Saf. Sci.* 124 (2020) 104588. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104588>.
- [13] E. Pastor, Direct Flame Contact, *Encycl. Wildfires Wildland-Urban Interface Fires.* (2019) 1–7. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_64-1.
- [14] L.M. Ribeiro, M. Almeida, J.A. Muñoz, Deliverable D2.1 - Report on real scale experiments, 2020. https://wuiview.org/download/WUVIEW_D2.1_F.pdf.
- [15] M.J. Hurley, D.T. Gottuk, J.J.R. Hall, K. Harada, E.D. Kuligowski, M. Puchovsky, J.L. Torero, J.J.M. Watts, W. CJ, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th ed., Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>.
- [16] National Fire Research Laboratory, Fire Calorimetry Database (FCD), (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.18434/mds2-2314>.
- [17] P. Vacca, E. Planas, C. Mata, J.A. Muñoz, F. Heymes, E. Pastor, Experimental analysis of real-scale burning tests of artificial fuel packs at the Wildland-Urban Interface, 2021.
- [18] D. Caballero, J. Sjöström, Deliverable D5.1 - Inventory of pattern scenarios, 2019. https://www.wuiview.org/download/WUVIEW_D5.1_F.pdf.
- [19] Society of Fire Protection Engineers, SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection, Society of Fire Protection Engineers (SFPE), 2007.
- [20] P. Vacca, A. Àgueda, J.A. Muñoz, E. Planas, E. Pastor, F. Heymes, E. Ismael, R. Eyssette, V. Cozzani, G.E. Scarponi, Deliverable 6.1 - Recommendations on structure survivability and sheltering capacity, (2020) 1–95.
- [21] P. Vacca, E. Planas, Deliverable D7.1 PBD WUI-specific final guideline, 2021. https://www.wuiview.org/download/D71_F_WUVIEW_PBD_guideline.pdf.
- [22] P. Vacca, A. Àgueda, E. Planas, J. Sjöström, F. Plathner, E. Hallberg, L.M. Ribeiro, M. Almeida, D. Caballero, Deliverable D7.2 Report on case studies, 2021.
- [23] T.J. Cova, P.E. Dennison, T.H. Kim, M.A. Moritz, Setting Wildfire Evacuation Trigger Points Using Fire Spread Modeling and GIS, *Trans. GIS.* 9 (2005) 603–617. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2005.00237.x>.
- [24] J. Wahlqvist, E. Ronchi, S.M.V. Gwynne, M. Kinatered, G. Rein, H. Mitchell, N. Bénichou, C. Ma, A. Kimball, E. Kuligowski, The simulation of wildland-urban interface fire evacuation: The WUI-NITY platform, *Saf. Sci.* 136 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105145>.
- [25] A. Beloglazov, M. Almashor, E. Abebe, J. Richter, K.C.B. Steer, Simulation of wildfire evacuation with dynamic factors and model composition, *Simul. Model. Pract. Theory.* 60 (2016) 144–159. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.10.002>.
- [26] C. Lautenberger, Mapping areas at elevated risk of large-scale structure loss using Monte Carlo simulation and wildland fire modeling, *Fire Saf. J.* 91 (2017) 768–775. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.014>.

- 4 Valutazione degli effetti termici in caso di incendio di un'imbarcazione di grandi dimensioni in banchina.
Evaluation of the thermal effects in case of a big fire of a moored yacht

VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI TERMICI IN CASO DI INCENDIO DI UN'IMBARCAZIONE DI GRANDI DIMENSIONI IN BANCHINA.

AUTORE: Paolo d'Angella, Senior Fire Engineer – Cantene srl

BIO

Laureato in ingegneria energetica, dal 2008 lavora presso Cantene srl, spinoff del Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino, dove ha sviluppato una profonda conoscenza degli strumenti della Fire Engineering. Nel corso dell'attività professionale ha maturato un'esperienza internazionale che riguarda la progettazione di sistemi e strategie antincendio con approccio prestazionale con particolare riferimento al settore delle infrastrutture. Si è infatti occupato della modellazione e simulazione fluidodinamica della metropolitana di Copenaghen linee 3,4 e della linea 6 della metropolitana di San Paolo in Brasile oltre che di svariati progetti di Fire Engineering sia in ambito civile che industriale in Italia e all'estero.

ABSTRACT

Il caso studio oggetto del presente articolo si riferisce a un problema di verifica della resistenza al fuoco delle strutture portanti della Torre Piloti in uno spazio aperto che, per le caratteristiche particolari del fabbricato da proteggere e per la complessità della sorgente di innesco, ha richiesto il supporto degli strumenti della modellazione CFD.

Al variare delle condizioni al contorno (vento), in presenza di un incendio di grandi dimensioni dovuto all'innesco di un'imbarcazione in vetroresina che può trovarsi in prossimità del fabbricato, possono infatti verificarsi condizioni tali per cui i prodotti della combustione possono investire la struttura in acciaio.

Per questo motivo, attraverso la modellazione CFD, è stata sviluppata un'analisi quantitativa finalizzata a determinare gli effetti termici dovuti a un incendio in modo da verificare il rispetto delle condizioni di sicurezza.

INTRODUZIONE

Il progetto preso in esame nel proseguo riguarda la realizzazione della nuova Torre Piloti a Genova secondo il progetto dello studio Renzo Piano Building Workshop.

Si tratta di un progetto che lo studio RPBW, insieme alle altre società componenti il team di progettazione, ha donato alla Autorità di Sistema Portuale di Genova e quindi alla città, a seguito del tragico incidente del 2013 che ha coinvolto la vecchia Torre di controllo. Nello specifico, una nave, durante le operazioni di manovra di uscita dal Porto collise violentemente con la Torre causandone il crollo immediato (l'incidente è avvenuto il 7 Maggio 2003 causando 9 morti e 4 feriti).



Figura 1. Vista dalla Darsena Fiera della Torre Piloti

La strategia antincendio presa a riferimento è stata sviluppata secondo la normativa di riferimento italiana, ovvero il Codice di Prevenzione Incendi allegato al D.M. 18.10.2019 che può essere preso a riferimento per la progettazione, la realizzazione e l'esercizio anche delle attività che non rientrano nei limiti di assoggettabilità previsti nell'allegato I del decreto del Presidente della Repubblica 1 agosto 2011, n. 151. Infatti, le attività che si svolgeranno all'interno della Torre, uffici e alloggi per il personale, non presentano caratteristiche tali, secondo la classificazione riportata all'Allegato I del D.P.R. 151/2011, da essere

inquadrabili come attività soggette ai controlli di prevenzione incendi.

Nella fattispecie, gli uffici prevedono la presenza di poche unità di personale, nettamente inferiori a 300 unità, condizione per la quale si configurerebbe l'attività soggetta 71.1.A "uffici". Per quanto riguarda invece gli alloggi per il personale della Capitaneria, non si ritengono inquadrabili all'interno di alcuna attività ai sensi del D.P.R. 151/2011 in quanto è ancora valido e applicabile il Parere del C.C.T.S. riportato nella Circolare 36 del 11/12/1985.

Il progetto è organizzato in due corpi di fabbrica: il primo sulla banchina che è diviso a sua volta in due blocchi da un sistema di scale e ascensore entrambi sollevati da terra su esili colonne controventate in acciaio. Entrambi i blocchi sono su due piani, al piano basso sono gli uffici e gli spazi comuni compresi gli alloggi del Personale Marittimo mentre al piano superiore sono le camere dei piloti. Al piano terra una recinzione in parte vetrata delimita l'area di accesso al complesso. Il secondo corpo è costituito invece dalla torre con la cabina di controllo alla cui base presenta un blocco mono piano che contiene tutti gli impianti. Questo è collocato su un'isola di nuova costruzione affiancata alla banchina Ovest. I due complessi sono collegati da una banchina su pali a livello del molo e da un ponte a sezione curva in acciaio al primo piano.

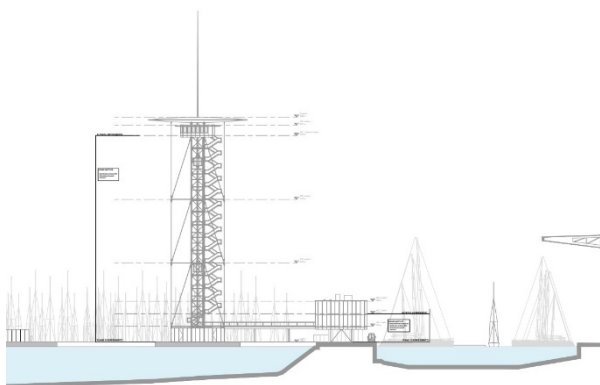


Figura 2. Sezione generale della Torre Piloti

Al fine della definizione dei livelli di prestazione delle misure antincendio, come previsto dal Codice di prevenzione incendi, è

stato attribuito all'intero edificio ospitante gli alloggi ed anche alla torre, in via cautelativa, il profilo di rischio vita Cii1 e il profilo di rischio beni pari a 2. Il rischio vita Cii2 è stato determinato in funzione delle caratteristiche degli occupanti, che possono essere addormentati, e della velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio, considerata media per la presenza di materiale combustibile che partecipa in maniera moderata all'incendio, secondo una valutazione che riprende le modalità previste anche dalla BSSC.

Il rischio beni invece ha tenuto conto dell'importanza strategica dell'edificio.

Di seguito una tabella riepilogativa dei livelli di prestazione attribuiti alle varie misure di prevenzione e protezione.

Tabella 1. Livelli di prestazione per le misure antincendio

Misura antincendio	Rif. C.P.I.	TORRE PILOTI			
		Livello Prestazione richiesto		Livello attribuito	
				C	A
Reazione al Fuoco	Cap. S1	Vie d'esodo	III	III	
		Altri locali	II	II	
Resistenza al Fuoco	Cap. S2		III	III	
Compartimentazione	Cap. S3		II	II	
Esodo	Cap. S4		I	I	
Gestione Sicurezza Antincendio	Cap. S5		I	I	
Controllo dell'incendio	Cap. S6		II	II	
Rivelazione ed allarme	Cap. S7		III	III	
Controllo fumi e calore	Cap. S8		II	II	
Operatività antincendio	Cap. S9		III	III	
Sicurezza Impianti Tecnologici	Cap. S10		I	I	

ANALISI

Il fabbricato oggetto dell'analisi è la torre piloti deputata alle funzioni di controllo di una generica area portuale. La struttura è in acciaio. Pertanto, si è reso necessario valutare quantitativamente gli effetti delle conseguenze di un evento incidentale che possa occorrere a un'imbarcazione di grande dimensione ormeggiata nelle vicinanze.

L'analisi è stata svolta mediante gli strumenti della fire engineering tenendo conto delle statistiche [3] del vento incidente (direzione e intensità) al fine di valutare i casi più sfavorevoli. Gli scenari individuati per l'analisi

numerica si riferiscono solo all'incendio di un'imbarcazione ormeggiata in prossimità della torre. L'analisi FSE è finalizzata a determinare gli effetti termici provocati dall'incendio di un'imbarcazione ormeggiata in corrispondenza della banchina Ovest - che corrisponde al punto più vicino alla Torre Piloti - quando il vento soffia spingendo i fumi verso le strutture della Torre.

L'analisi è sviluppata utilizzando il codice di calcolo Fire Dynamics Simulator (FDS) [1], e il software Pyrosim per il pre e post processing.

PECULIARITA' DELL'ANALISI

Lo studio FSE presenta le seguenti peculiarità:

- Il dominio di calcolo è caratterizzato da grandi dimensioni: comprende lo scafo sede d'innescò, un volume di controllo tale da contenere il fabbricato della Torre Piloti e una porzione di ambiente circostante in modo da modellare compiutamente gli effetti del vento.
- Il processo di combustione è modellato tenendo conto della progressione dell'incendio che propaga tra i vari materiali e arredi costituenti lo scafo. Il calore prodotto è modellato a partire dalle curve di rilascio della potenza termica determinate sperimentalmente per campioni di materiale relativi alla struttura esterna dello scafo e agli interni.
- Per modellare in modo accurato l'incendio è necessaria una griglia di calcolo raffinata su tutto lo scafo incrementando in modo significativo il costo computazionale della simulazione.

DOMINIO DI CALCOLO

Il dominio di calcolo ha un'estensione in pianta di circa 2600 m² ed un'altezza pari a quella della torre piloti dal livello del mare, 66m.

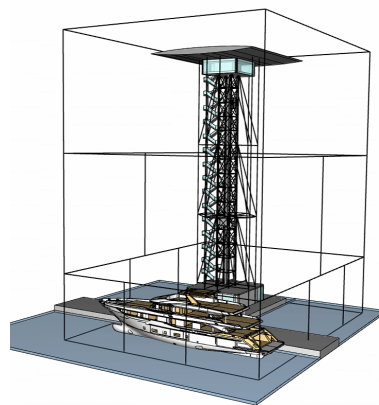


Figura 3: Dominio di calcolo (46 x 58 x 66m)

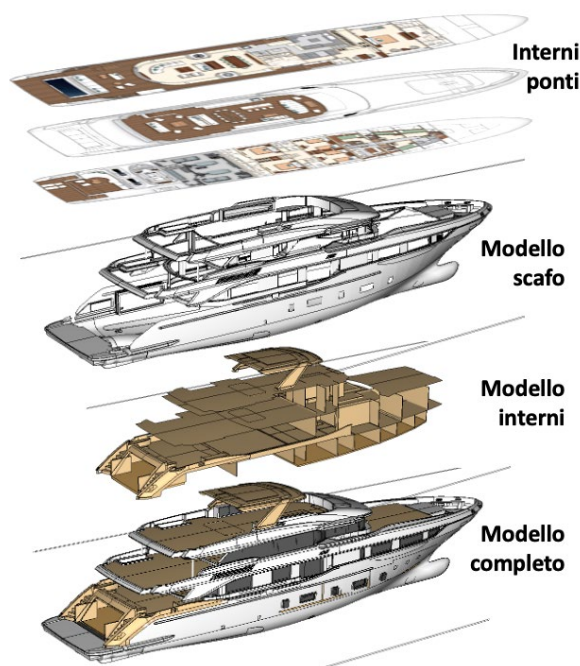


Figura 4: modello scafo

MODELLO DELLO SCAFO

Si considera uno scafo da 45m di un generico yacht con tre ponti, in quanto rappresentativo di un'imbarcazione di grandi dimensioni di cui si è in possesso dei dati sperimentali relativi alla combustione dei materiali. Il modello è creato a partire da una geometria 3D importata ed è scomposto, tramite gli algoritmi di PyroSim, in singoli elementi cubici allineati alle celle della mesh.

MODELLO D'INCENDIO

L'incendio è modellato impostando le proprietà di combustione (temperatura di ignizione e rilascio di calore superficiale specifico) della struttura del modello dello scafo. Si modella un piccolo innescò che produce gas ad elevata temperatura. Gli

elementi nei quali è suddivisa la struttura dello scafo innescano quando la loro temperatura superficiale raggiunge il valore di ignizione (450°C). Sono state considerate due tipologie di materiale con uno per gli interni e uno per lo scafo. In questo modo si modella la propagazione dell'incendio tra le parti dello scafo. Ogni elemento si innesca, brucia fino ad esaurire la sua massa combustibile e scompare modificando quindi la geometria dello scafo.

Questo metodo permette di modellare con elevato realismo il fenomeno di incendio perché, simulandone la propagazione tridimensionale e la modifica della geometria in tempo reale, descrive in modo accurato l'interazione tra il plume e l'aria comburente. Il rilascio di calore specifico del materiale dello scafo è determinato attraverso prove sperimentali condotte sugli elementi reali (provini dello scafo in materiale composito in vetroresina, Figura 3, e della struttura interna in materiale composito in vetroresina con anima di PVC, Figura 4) condotte dall'armatore dello scafo e coperte da segreto industriale.

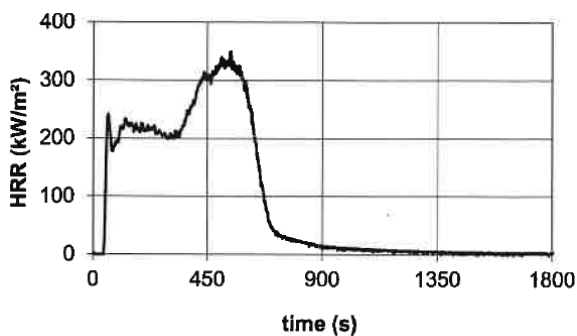


Figura 5: Curva HRR sperimentale - provino scafo

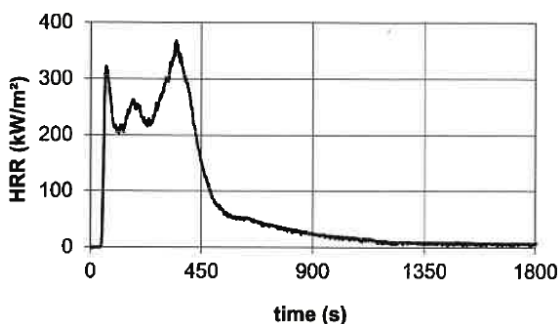


Figura 6: Curva HRR sperimentale - provino struttura interni

Questo metodo è un buon compromesso tra il metodo semplificato che prevede di impostare una superficie che rilasci il calore corrispondente ad una curva HRR di letteratura e il metodo complesso che prevede la modellazione della pirolisi dei materiali. Modellare la pirolisi ha dei costi computazionali non applicabili all'esigenze ingegneristiche di questo problema. L'utilizzo di una curva da letteratura non permetterebbe di tener conto della dinamica di propagazione e sviluppo tridimensionale dell'incendio.

Per valutare uno scenario conservativo e quindi la combustione della maggior parte dello scafo si ipotizza che l'innescò sia localizzato al livello più basso dell'imbarcazione. In queste condizioni il fuoco propaga dal ponte più basso al ponte più alto coinvolgendo la maggior parte di combustibile.

La curva HRR è, pertanto, un risultato della simulazione. Il valore massimo è di circa 300 MW ed è raggiunto dopo 360 secondi dall'innescò.

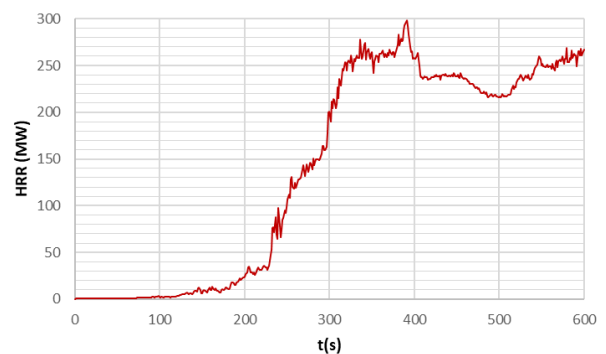


Figura 7: Curva HRR risultante dalla simulazione

MESH DI CALCOLO

Il dominio di calcolo è scomposto in 10 mesh che permettono di parallelizzarne il calcolo su 10 processori e quindi di velocizzarne il tempo di simulazione. La mesh è composta da celle di formato cubico con lato di dimensione variabile tra 0,2m e 0,8m. La porzione più raffinata è in corrispondenza dello scafo e della porzione di torre piloti più vicina ad esso. Questo consente una descrizione più dettagliata della geometria esterna ed interna dello scafo, permette di rappresentare al meglio l'incendio e di valutare in modo accurato lo stress termico che insiste sulla parte più esposta della torre, la base. La

porzione della mesh più raffinata ha una risoluzione elevata se si considera il rapporto tra il lato della cella (δx) e il diametro caratteristico (D) calcolato secondo la formula [1]:

$$D = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} * c_p * T_{\infty} * \sqrt{g}} \right)^{2/5}$$

Dove D è il diametro caratteristico dei fenomeni di turbolenza, Q è la potenza di incendio, ρ_{∞} è la densità d'aria della zona indisturbata, c_p è il calore specifico dell'aria, T_{∞} è la temperatura d'aria della zona indisturbata, g è l'accelerazione di gravità. Il rapporto $\delta x/D$ è pari a 0,021 sulla mesh più raffinata.

CONDIZIONI AL CONTORNO

In condizioni di assenza di vento, un eventuale incendio di un'imbarcazione adiacente la torre produrrebbe un plume di fumi verticale che non lambisce la struttura della torre. Le condizioni ambientali che massimizzano la sollecitazione termica sulla torre piloti sono quelle in cui il vento spinge i fumi verso la torre. Per questo motivo nel modello computazionale il vento è simulato con intensità costante e direzione Sud-Ovest verso la torre (direzione prevalente del vento). Sebbene i dati meteorologici [3] del campione statistico a disposizione evidenzino la presenza di raffiche fino a circa 100 km/h, applicando un valore costante (10m/s, corrispondente al valore medio del campione misurato) è possibile ottenere una flessione uniforme del plume verso la torre e massimizzare quindi lo stress termico sul bersaglio. Modellare le raffiche o valori più elevati del vento porterebbe a raffreddare troppo i fumi e creare turbolenze che spostano di continuo il punto di impatto dei fumi sulla torre.

Al fine di rappresentare una configurazione che fosse la più gravosa, i vetri dello scafo sono stati modellati aperti. Questa condizione, cui corrisponde il maggiore afflusso d'aria sull'incendio, migliora le condizioni di

combustione e la rapidità con cui cresce la curva HRR nel tempo.

RISULTATI

I valori di temperatura e irraggiamento misurati prestazionalmente non sono mai tali da generare interferenze verso gli elementi strutturali. I fumi caldi, anche in presenza di vento nella direzione della torre, si mescolano all'aria fresca che ne abbassa la temperatura. Il valore massimo di temperatura registrato è di circa 200°C (in corrispondenza del riquadro rosso in figura). I valori di irraggiamento sono trascurabili. Nelle figure seguenti sono riportate le prestazioni monitorate (temperatura e irraggiamento) in corrispondenza degli istanti caratteristici:

- t=390s istante in cui si raggiunge il valore HRR di picco;
- t=600s in cui le condizioni dell'incendio si possono ormai considerare stazionarie.

Le prestazioni sono fornite in corrispondenza di un piano sezione e in pianta in modo da fornire quantitativamente e qualitativamente l'idea dell'evoluzione del fenomeno.

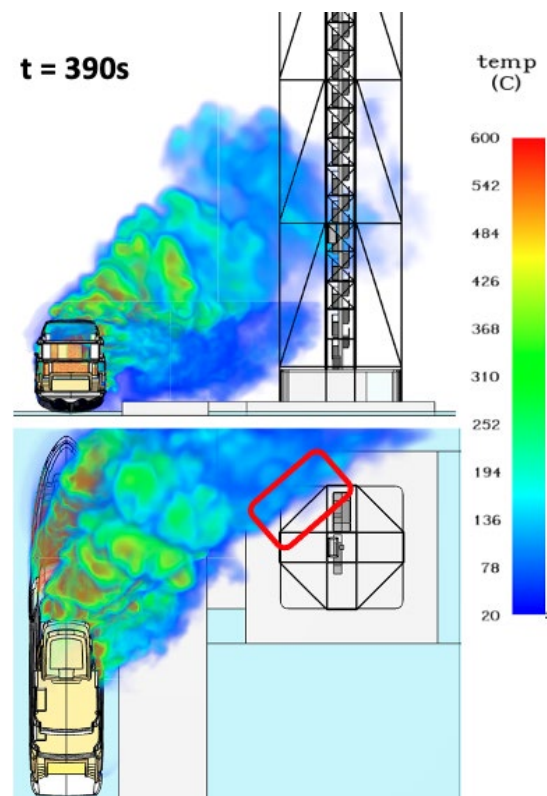


Figura 8: Plot 3D. Temperatura dei gas in corrispondenza del tempo con HRR max

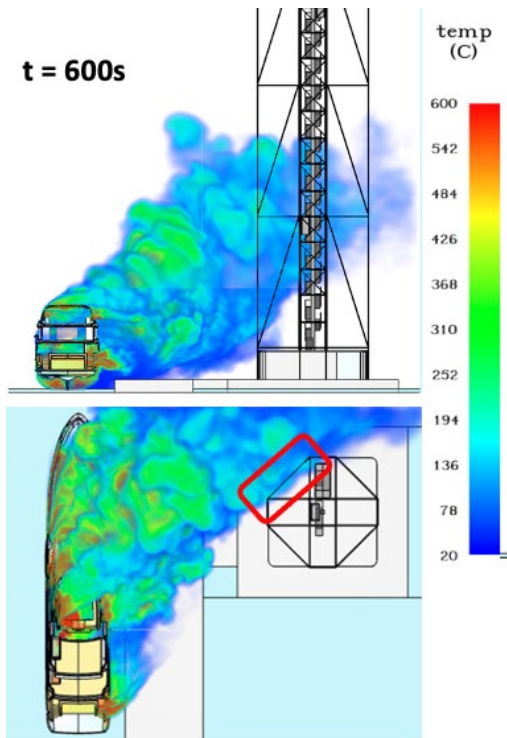


Figura 9: Plot 3D. Temperatura dei gas in corrispondenza dell'istante in cui si raggiungono condizioni stazionarie di HRR

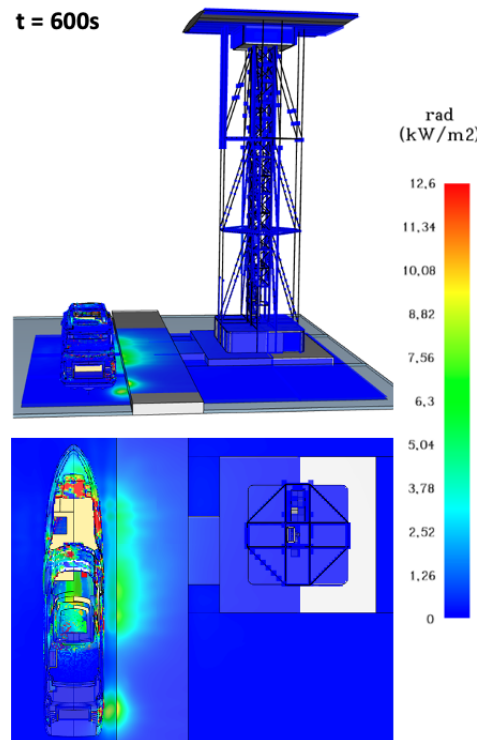


Figura 11: Irraggiamento sulle superfici della torre e dello scafo. Tempo corrispondente a condizioni stazionarie

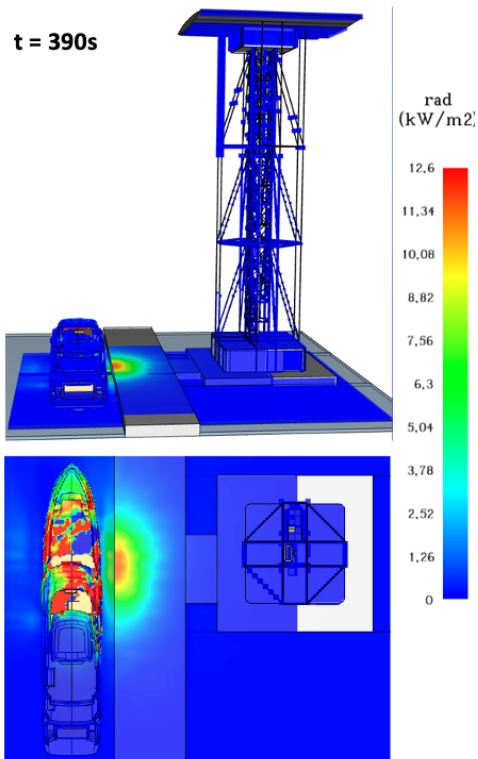


Figura 10: Irraggiamento sulle superfici della torre e dello scafo. Tempo corrispondente ad HRR max.

CONCLUSIONI

Lo studio ha dimostrato che anche in caso di incendio di una grossa imbarcazione da diporto, in vetroresina, gli effetti termici dell'incendio non interferiscono con la struttura della Torre Piloti.

Il fatto di trovarsi in uno spazio a cielo aperto, nonostante le ipotesi estremamente cautelative di considerare l'imbarcazione in prossimità della Torre in presenza di un vento che spinga i prodotti della combustione verso la Torre, fa sì che i fumi si miscelino con l'aria raffreddandosi. La componente radiativa non è tale da indurre effetti critici per via della distanza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Fire Dynamics Simulator (Version 6) - User's Guide, NIST, 2020.
- [2] DM 18/10/2019 "Modifiche all'allegato 1 al decreto del Ministro dell'interno 3 agosto 2015, recante «Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139».
- [3] Torre piloti Genova, progetto di fattibilità tecnico economica Analisi delle azioni del vento sulle strutture della torre, 2020.

EVALUATION OF THE THERMAL EFFECTS IN CASE OF A BIG FIRE OF A MOORED YACHT

AUTHOR: Paolo d'Angella, Senior Fire Engineer – Cantene srl

BIO

Bachelor Degree in energy engineering, since 2008 Paolo works at Cantene srl, spin off of the Energy Department of the Politecnico di Torino where he developed a strong experience in Fire Engineering modelling and simulations codes. During his professional activities he followed several international projects about the design of tunnel ventilation system (road and metro), the design of safety plan of skyscrapers, shopping malls. He has led the 1D and CFD analyses for Metro Copenhagen Metro (line 3,4) and San Paolo Metro (line 6).

ABSTRACT

This case study refers to a fire protection problem related to the load-bearing steel structure of a control tower in a port. Main issues have been the complexity of the fire source and the geometric characteristics of the building. For these reasons, to investigate some aspects of the fire resistance capabilities, a performance based approach has been used.

The object of the CFD study has been to evaluate what happens to the Pilot Tower steel structure when smoke, produced by a close fire due to the ignition of a big yacht, is moved toward the tower by the wind.

An analysis of the quantitative effects produced by fire in terms of temperature and radiative fraction was developed through a CFD model. In this way, safety conditions have been verified.

INTRODUCTION

The analysed case study concerns the realization of the new “Torre piloti” in Genoa, according to the project of Renzo Piano Building Workshop Studio.

The project was donated to the Genoa Port System Authority, and therefore to the city, by the RPBW studio together with the other companies in the design team after the tragic accident that involved the old Control Tower. In detail, a ship violently collided with the Tower during the operations of manoeuvring out of the Port, causing its immediate collapse (the accident occurred on May 7, 2013 and resulted in 9 deaths and 4 injuries).



Figure 1. View of the “Torre Piloti”

The fire strategy was developed according to the Italian regulations, i.e. the Fire Prevention Code attached to the Ministerial Decree 18.10.2019. It can be taken as reference for the design, construction and management of activities that do not fall within the application limits provided in the Annex I of the Decree of the President of the Republic (D.P.R.) 1 August 2011, n. 151.

In fact, the activities that will take place inside the Tower, offices and staff accommodation, cannot be classified as activities subject to fire prevention controls, according to the classification reported in Annex I of the 151/2011 D.P.R.

In this case, the presence of a few units of staff is envisaged in the offices, well below 300 units. This condition would group the activity under the category 7.1.1 “offices”. With regard to the accommodation for the personnel of the Captaincy, this activity is not grouped under any category in the D.P.R. 151/2011 because

it is still valid and applicable the opinion of the C.C.T.S. reported in the Circular 36 of 11/12/1985.

The project consists of two buildings: the first one on E quay is divided into two blocks by a staircase and elevator system, both raised from the ground on slender steel braced columns. There are two floors in both blocks; offices and the common areas including the Maritime Personnel quarters are located on the lower floor while the pilots' rooms are on the upper floor. A partly glazed fence delimits the access area to the buildings complex on the ground floor.

The second building consists of the tower with the control cabin. At the base, a single-storey block contains all the plants. This building is located on a newly built island next to the West quay. The two buildings are connected by a quay on piles at quay level and by a curved steel bridge on the first floor.

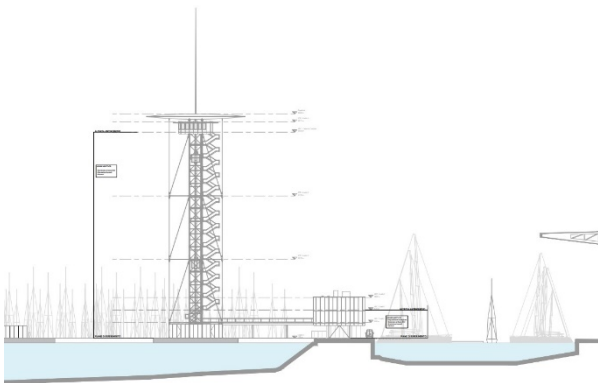


Figure 2. General section of the "Torre Piloti"

In order to establish the performance levels of the fire prevention measures, as defined by the Fire Prevention Code, the life risk profile Cii1 and the property risk profile equal to 2 were assigned to the entire building hosting the lodgings and the tower as a precautionary measure. The life risk Cii2 was determined according to the characteristics of the occupants, who may be asleep, and the prevailing characteristic fire growth, considered medium for the presence of combustible material that moderately participates in the fire, according to evaluations in line with the methods provided by the BSSC as well.

On the other hand, the property risk profile value was assigned considering the strategic importance of the building.

In Table 1, a summary of the performance levels attributed to the various prevention and protection measures is provided.

Table 1. Performance levels for fire protection measures

Fire Safety measure	Ref. C.P.I.	TORRE PILOTI			
		Performance Level Required	Assigned Level		
			C	A	
Fire reaction	Ch. S1	Egress route	III	III	
		Other rooms	II	II	
Fire resistance	Ch. S2		III	III	
compartmentalization	Ch. S3		II	II	
Egress	Ch. S4		I	I	
Fire Safety Management	Ch. S5		I	I	
Control of the fire	Ch. S6		II	II	
Detection and alarm	Ch. S7		III	III	
Smoke and heat control	Ch. S8		II	II	
Fire fighting operations	Ch. S9		III	III	
Technological Systems Safety	Ch. S10		I	I	

THE ANALYSIS

The analysis aims to determine the thermal effects due to the fire in correspondence of the West platform, the closest point respect to the Pilot Tower, in the worst case from the point of view of the wind direction.

The analysis has been developed using FDS (Fire Dynamics Simulator (FDS) [1], and PyroSim for pre and post processing.

MAIN ISSUES

Main issues are:

- Calculation domain is huge: it has to include the hull, a volume including the tower and enough portion of the adjacent environment in order to model the wind effect.
- The combustion process is modelled considering the fire propagation among materials that are part of the boat structure. HRR experimental curves of each material have been considered. The heat released is based on tests executed on “real” portion of a big yacht (internal and external elements).
- To model the fire with a high level of accuracy, a high-resolution mesh grid has been used with the consequence to have a very high calculation cost.

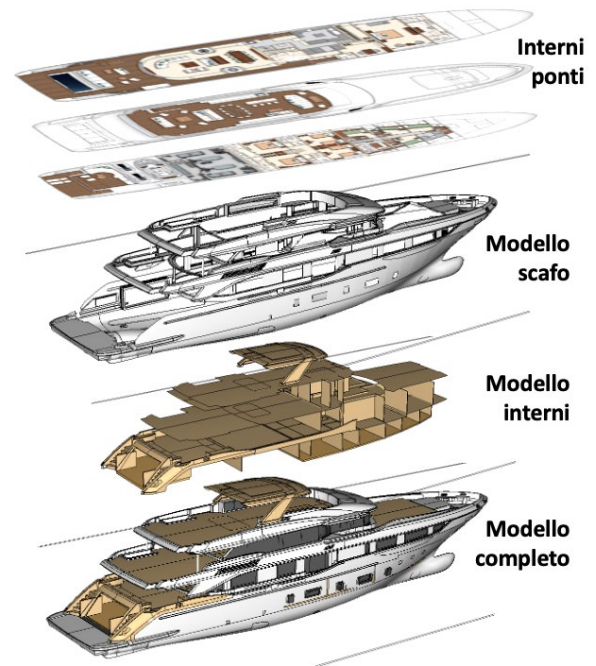


Figure 4: Hull model

CALCULATION DOMAIN

Calculation domain is extended for an area of 2600 m² and it is 66 m high.

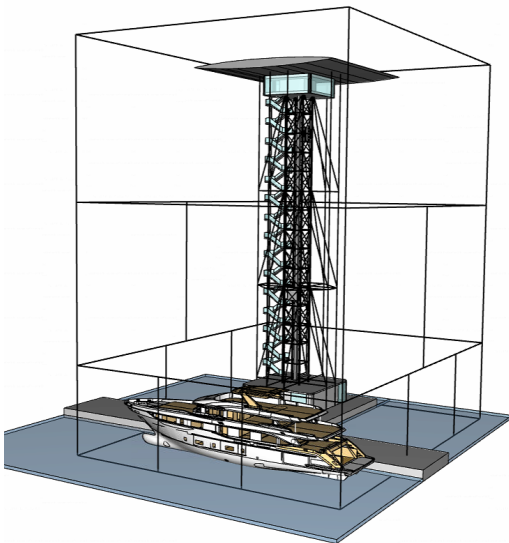


Figure 3: calculation domain (46 x 58 x 66m)

YACHT MODEL

It has been considered a hull of 45m of a generic 3 decks yacht, because it is representative of a big yacht and the characteristics of burning materials were known. The model has been created starting from an imported 3D geometry and dividing it in singles cubic elements aligned to the cells using PyroSim.

FIRE MODEL

The fire source is modelled setting the combustion properties (ignition temperature and the heat release rate for unit area) of the hull structure.

The fire propagation in the model is based on the following dynamic: the ignition of a small part of the hull produces high temperature gas; other elements of the hull ignites when their surfaces are exposed to hot gases temperature and the material reach the ignition temperature (450°C). Two material types have been considered, one for the hull and the other for the internal structure. Each element burns until its mass is finished. At that time, it disappeared modifying the geometry of the yacht as in the real case.

This method guarantees the reproduction of the fire phenomena with a high level of realism because, simulating the tri-dimensional propagation through the structure and the consequent structure modification, it describes in an accurate way the interaction between the plume and incoming air. The heat release rate of each element surface of the model has been characterized on the base of experimental test on the real elements (hull panels of fiberglass composite material, Figure 3, internal structure panel of fiberglass composite material with PVC core, Figure 4) conducted by the yacht producer.

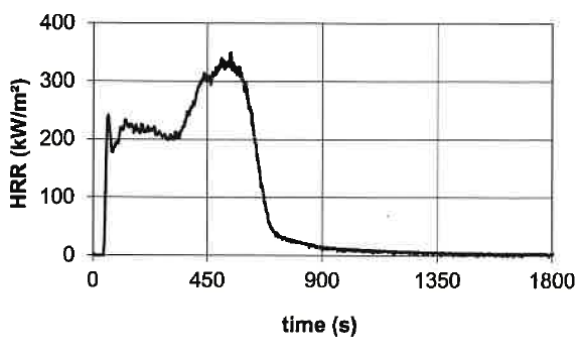


Figure 5: HRR experimental curve – hull

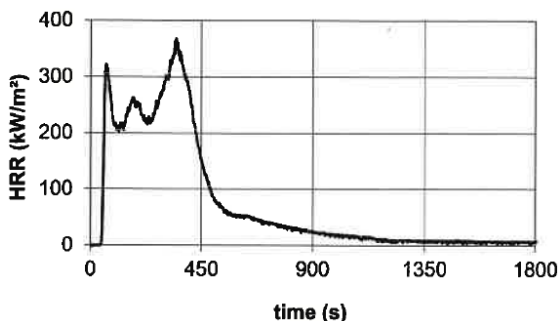


Figure 6: HRR experimental curve –internal structure

This method is a good compromise between the simplified method (modelling a burning surface releasing an imposed quantity of heat that corresponds to a HRR curve from literature) and the complex method that account the pyrolysis of materials. Modelling the pyrolysis has not affordable computational costs for this engineering application. Using the simplified method and imposing the heat release rate curve would not allow to model the correct tri-dimensional dynamic of the fire that spread inside the yacht.

To evaluate a conservative fire scenario and hence the combustion of most of the yacht material, it is assumed that the ignition is located at the lower level of the yacht. In these conditions the fire propagates from the lower deck to the upper one involving all the three levels.

The HRR curve is a simulation result. The maximum HRR value is about 300MW and it is reached 360s after the ignition.

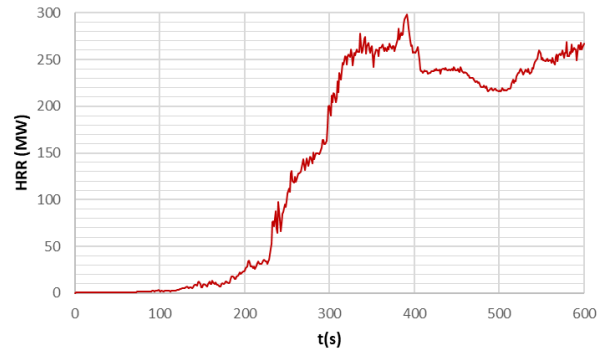


Figure 7: HRR curve. CFD simulation result

MESH

The domain has been divided into 10 mesh to process the calculations on 10 cores. Mesh is of cubic cells (0,2m ÷ 0,8m).

The portion characterized by the highest resolution is located in the lower part of the hull and close to the target (steel structure). In this way the fire source is good represented and at the same time the results in terms of monitored performances are well collected. The ratio between cells side (δx) and the characteristic diameter (D) is equal to 0,021 in the most refined part of the mesh. The characteristic diameter is a quantity related to the turbulence phenomena and it is calculated by the

$$D = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} * c_p * T_{\infty} * \sqrt{g}} \right)^{2/5}$$

following formula [1]:

where D is the characteristic diameter, Q is the fire power, ρ_{∞} the air density in the undisturbed air, c_p è air specific heat, T_{∞} è is the air temperature, g is the gravity acceleration.

BOUNDARY CONDITIONS

The worst case has been identified when a wind of 10 m/s that is the average value

measured starting from year stats [3]. Even if higher values of wind have been measured (100 km/h), an average value of 10 m/s for the entire period of the simulation can be considered the basis for the worst case because it is able to move the plume of fire toward the tower creating the worst conditions from the point of view of the thermal stress to the steel elements.

Higher wind values or variable wind speed would contribute to increase turbulence phenomena, cooling the smoke and moving the impact area between the plume and the tower structure.

The windows of the yacht have been considered open to maximize the airflow toward the fire and maximize the heat release rate.

RESULTS

Temperature and radiative fraction measured close to the structure are under values that could be critical for the fire resistance.

Smoke is diluted by the air and the maximum temperature is in fact around 200 °C. The radiation is negligible.

The results are reported for characteristic times:

- t=390s (HRR peak value);
- t=600s (HRR has reached the steady state).

Performances are taken in correspondence of a plan and section views to better explain the phenomena.

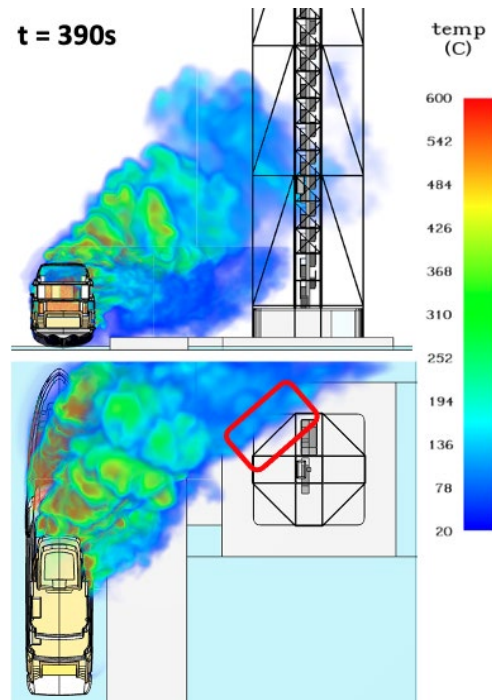


Figure 8: Plot3D. Temperature values at the time that corresponds to HRRmax

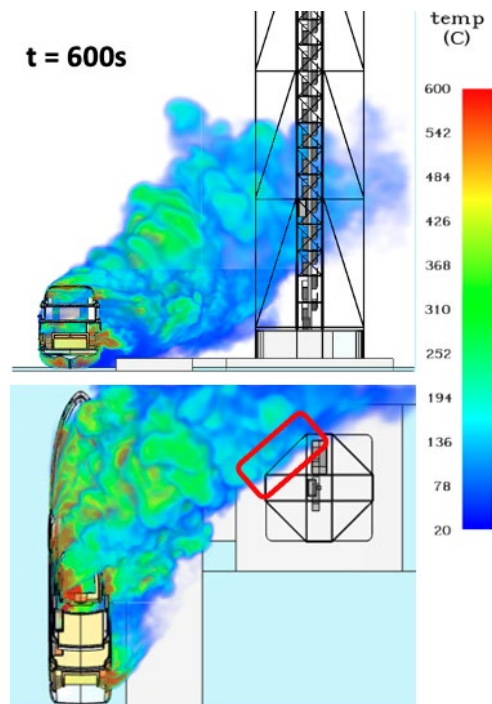


Figure 9: Plot3D. Temperature values at the time that corresponds steady state conditions

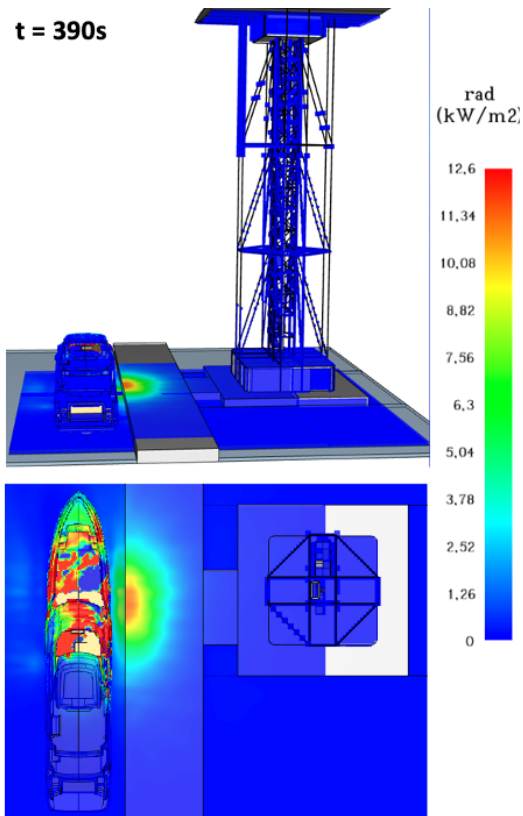


Figure 10: Radiative heat flux on tower and hull surfaces at the time that corresponds to the HRRmax value

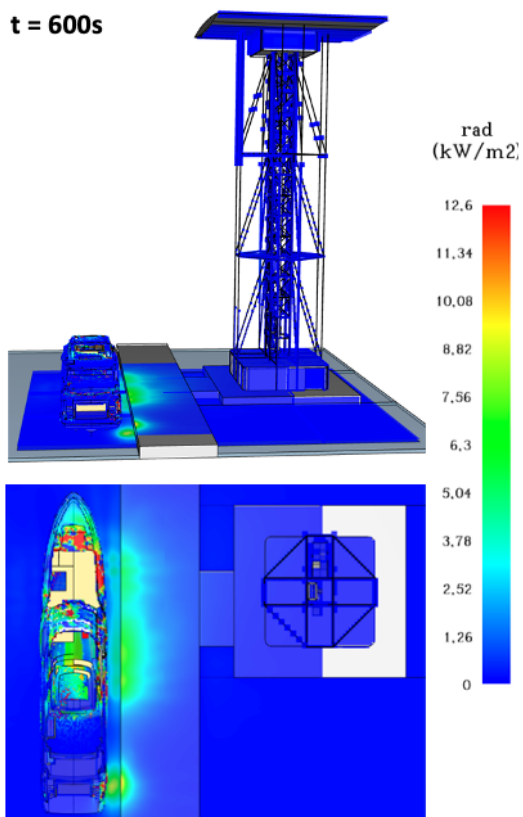


Figure 11: Radiative heat flux on tower and hull surfaces at steady state conditions

CONCLUSIONS

The analysis demonstrated that the thermal effects of a big fiberglass yacht are not able to create critical conditions from the point of view of the fire resistance of the tower.

The port is an open area. Smoke is diluted in the environment and even if the wind pushes the plume toward the tower, the increase of the temperature in correspondence of the steel structure is negligible. The same behaviour is observed for the radiative heat flux.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Fire Dynamics Simulator (Version 6) - User's Guide, NIST, 2020.
- [2] DM 18/10/2019 "Modifiche all'allegato 1 al decreto del Ministro dell'interno 3 agosto 2015, recante «Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139».
- [3] Torre piloti Genova, progetto di fattibilità tecnica economica Analisi delle azioni del vento sulle strutture della torre, 2020.

- 5 Le numerose sfide antincendio per la progettazione di data centre
The Numerous Fire Safety Challenges of Data Centre Design

LE NUMEROSE SFIDE ANTINCENDIO PER LA PROGETTAZIONE DI DATA CENTRE

AUTORE: Pasquale Iovino, Fire Safety Engineer per Arup, Dublino, Irlanda

BIO

Laureato in Fire Safety Engineering con un corso di studi internazionale (IMFSE) organizzato da tre delle principali università in Europa e Inghilterra. Pasquale ha iniziato a lavorare in Arup nel 2017 svolgendo la sua attività professionale presso le sedi di Dublino e New York. Durante la sua attività professionale, ha partecipato alla realizzazione di grandi progetti internazionali in Europa, Inghilterra, America ed Australia, con approccio prescrittivo ed utilizzando codici e standard internazionali. Pasquale è, altresì, specializzato nell'utilizzo di metodi prestazionali e nell'analisi del rischio quantitativo e qualitativo, analisi fluidodinamiche di tipo CFD, e simulazioni di esodo. Durante il suo periodo lavorativo negli Stati Uniti, ha anche perfezionato la progettazione di sistemi antincendio attivi in conformità con gli standard assicurativi e di internazionale regime.

ABSTRACT

Siamo nella quarta rivoluzione industriale: *The Internet of Things*. L'esplosione di tecnologia nelle nostre vite sta velocemente rivoluzionando il modo in cui viviamo, lavoriamo ed interagiamo. Questo esponenziale aumento di dati ha anche scatenato una crescente domanda per strutture di *data centre*.

Le strutture di *data centre* sono progettate per ospitare uno scarso numero di occupanti con un importante numero di attrezzature IT. Oltre le prescrizioni per la sicurezza per la vita, la continuità delle operazioni e la protezione della proprietà, devono essere considerati nella progettazione i potenziali danni finanziari e reputazionali che possono essere scatenati da un'interruzione dell'attività.

Questo articolo approfondisce le sfide sulla tematica antincendio nella progettazione di strutture *data centre* e le future opportunità nascenti in questo campo.

INTRODUZIONE

Oggi molte persone non riescono ad immaginare la loro vita senza l'utilizzo di internet. Nel mondo, il numero di utenti che navigano nel web è aumentato da 413 milioni nel 2000, ad oltre 3.4 miliardi nel 2016 [1]. In aggiunta, la pandemia Covid-19 ha accelerato la necessità delle aziende di meglio strutturarsi, utilizzando uno spazio di lavoro fondato sul *cloud*. Questa rivoluzione, basata sul *cloud* ha il grande pregio di garantire la continuità del lavoro in qualsiasi momento e luogo.

Ogni giorno, infatti, ci sono 2.5 quintilioni bytes (or Exabyte) di dati creati. I numeri sono in grande crescita: basti pensare che negli ultimi 2 anni è stato creato il 90% di tutti i dati esistenti [2]. Questa produzione di dati giornaliera equivale ai dati contenuti in 625 milioni di DVD. Ed i numeri, per quanto già di per sé notevoli, sono destinati ad aumentare ancora. Una larga porzione di memorizzazione dei dati è dominata da pochi attori di questo mercato, generalmente chiamati giganti del *tech*.

Contemporaneamente alla rivoluzione tecnologica in atto, è in forte crescita la richiesta per la disponibilità di strutture *data centre*. La Figura 1 e la Figura 2 illustrano la distribuzione di strutture *data centre* all'inizio del 2021, prendendo ad esame i principali paesi con maggior numero di *data centre*. Occorre sin d'ora precisare che quando parliamo di *data centre* ci riferiamo ad una struttura con alti livelli di sicurezza che le aziende usano per contenere le loro informazioni e dati. La progettazione di queste strutture è basata sulla rete di informatica e capacità di deposito che rende possibile l'uso di applicazioni condivise e dati [3].

Le strutture di *data centre* offrono:

- **Infrastruttura di rete** - capace di connettere i servers, impianti del *data centre*, deposito per l'utilizzatore finale.
- **Infrastruttura di memorizzazione** - I dati sono i mezzi per i *data centre* e i sistemi di memorizzazione sono usati per questa preziosa comodità.

- **Risorse informatiche** - Le applicazioni sono i motori dei data centre. Questi servers forniscono il processing, la memoria e la memorizzazione locale.

Vista la specifica funzione della struttura data centre, ognuno dei giganti del tech ha il proprio modello di struttura per efficienza. I complessi impianti elettrici e meccanici agevolano il funzionamento della struttura. E per tale motivo, in sede di progettazione delle predette strutture, occorre attenzionare e porre grande interesse ai complessi impianti elettrici e meccanici.

Il presente articolo nasce e trae spunto dalla esperienza professionale dell'autore, sviluppatasi in diversi paesi e continenti. Si precisa sin d'ora che, trattandosi di progetti

fortemente confidenziali, non verranno utilizzati *case studies*.

Il presente lavoro si pone l'obiettivo ambizioso di far luce sulle atipiche sfide inerenti all'antincendio durante la progettazione di strutture data centre. Se è di pronta evidenza la necessità di conformarsi alle rigide previsioni normative, ai fini della tutela della salute e vita umana, possono sorgere importanti sfide antincendio dovute alla funzionalità della struttura, alla protezione dei beni e alle tecnologie usate (per esempio sistemi di accumulatori elettrici). Sebbene non ci siano ancora chiare soluzioni per ognuna delle sfide, gli ingegneri antincendio possono e devono lavorare per arrivare ad una dettagliata e innovativa soluzione dei problemi.

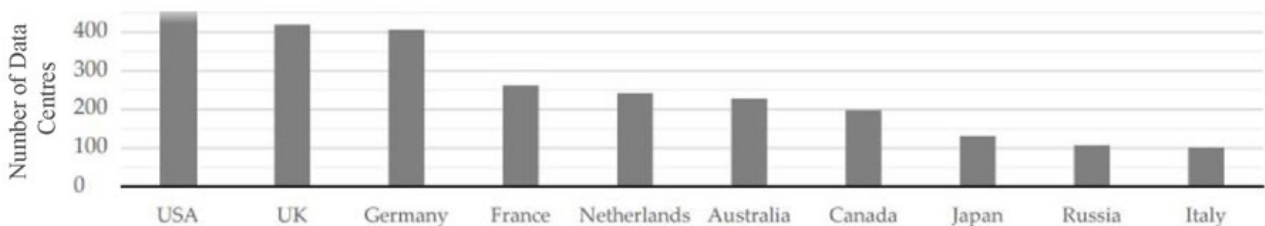


Figura 1 Distribuzione Quantitativa di Strutture Data Centre nei Paesi Principali all'inizio del 2021 [4]

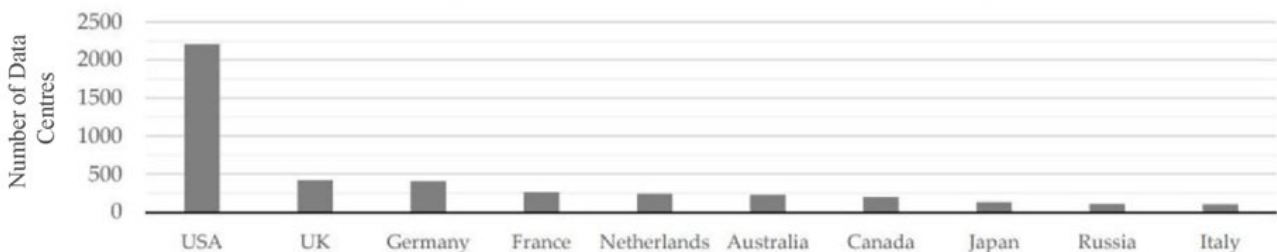


Figura 2 Distribuzione Quantitativa di Strutture Data Centre nei Paesi Principali all'inizio del 2021 [4]

Le esigenze delle Strutture Data Centre
 Come già discusso, ci sono diversi aspetti della funzionalità del data centre che presentano sfide per l'ingegnere antincendio. Questi aspetti sono connessi alla richiesta del cliente che chiede venga garantita la continuità delle operazioni. Qualsiasi tipo di interruzione di operazione può causare gravi danni finanziari e di reputazione. Quindi in caso di emergenza, diventa fondamentale riuscire a minimizzare i danni ai beni e le interruzioni di operazione. Per raggiungere questi obiettivi la progettazione di sistemi

antincendio deve essere personalizzata per ogni edificio. La Figura 3 illustra che il costo di un singolo parziale e totale arresto di data centre è aumentato negli ultimi anni. Questo è il risultato del fatto che internet è diventato uno strumento essenziale per il commercio. Si pensi che in un solo giorno oltre \$2 milioni di commercio elettronico vengono effettuati online nel mondo [5]. Come dimostrato in questi esempi, un piccolo arresto di un data centre può comportare gravi implicazioni.

1. Nell'agosto del 2016 un modesto incendio nel data centre di Delta Airlines in Atlanta

ha causato un blackout provocando la cancellazione di ben 2.300 voli e l'interruzione di molti altri. La perdita per la società è stata stimata in circa \$100 milioni.

2. Nel luglio del 2016, il principale data centre per il governo canadese fu disattivato per la presenza di fumo come conseguenza di un modesto incendio. Tale evento ha comportato una perdita di 50.000 e-mail degli impiegati e 80.000 pagamenti di stipendi in ritardo [6].

Per garantire la continuità delle operazioni, durante la progettazione antincendio devono essere considerate le seguenti esigenze della struttura:

- **Operazione 24/7**- I data centre devono essere operativi 24 ore a settimana durante l'intero anno, tenendo in considerazione la manutenzione programmata per ridurre potenziali interruzioni. Per questo motivo, il sistema di ventilazione per il raffreddamento dei server deve funzionare anche in caso di eventi di emergenza, come appunto un incendio.
- **Sicurezza** - Vista la sensibilità dei dati contenuti in queste strutture, un alto livello di sicurezza è essenziale per evitare intrusioni da parte di personale non autorizzato. Questo livello di sicurezza deve essere mantenuto anche durante le emergenze.
- **Sostenibilità** - È stato prospettato che, nell'anno 2021, il settore dei data

centre sarà responsabile per circa 3.5% dell'emissione locale di carbonio – maggiore dell'emissione di carbonio da parte del mondo dell'aviazione [7]. I data centre necessitano di enormi quantità di beni primari per le loro operazioni (per esempio, acqua e energia). Quindi, la progettazione della struttura è fortemente concentrata sul consumo di acqua, energia ed emissione di carbonio, con l'obiettivo, non solo di ridurre il proprio impatto sull'ambiente, ma anche di aiutare altri settori, come riciclo di calore residuo.

- **Efficacia della Struttura** - Conseguentemente alla velocità del mondo dei dati, ogni gigante del tech ha realizzato una progettazione ideale della struttura. Questa progettazione ottimizzata deve soddisfare gli elevati standard di efficienza desiderati. Questa ideale progettazione spesso contrasta con le raccomandazioni delle normative antincendio in materia di compartimentazione tagliafuoco (ad esempio la grandezza del compartimento supera le raccomandazioni delle normative) e sistemi antincendio (per esempio bassa efficienza dei tipici sistemi di rilevazione incendi). Quindi, l'approccio prestazionale è generalmente utilizzato per giustificare queste caratteristiche non in linea con la normativa e per assicurare che sia raggiunto un sufficiente livello di sicurezza antincendio.

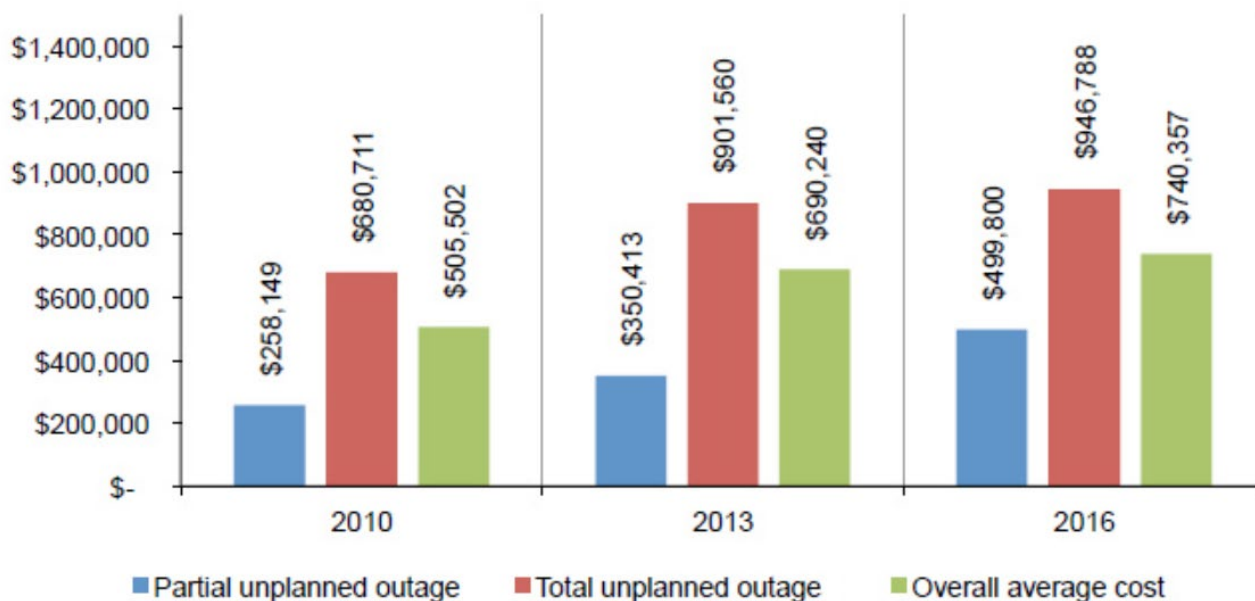


Figura 3 Costo Medio per Singola Interruzione Data Centre [5]

L'importanza della Partecipazione di un Ingegnere Antincendio

Vista la natura dei dati memorizzati nella struttura e la necessità di operazioni continue e anche di specifici requisiti di sicurezza, la progettazione della prevenzione incendi spesso supera e a volte contrasta con le normative antincendio locali.

Questa industria si sta continuamente innovando nella ricerca di efficienza tecnologica, ambientale, economica e di costruzione. Nuovi materiali e attrezzature utilizzati per i data centre (come divisioni whitewall e pannelli fotovoltaici, ecc.) potrebbero risolvere una serie di sfide riguardanti l'efficienza della struttura, ma presentano un'intera nuova serie di sfide per la prevenzione incendi. Per esempio, la continuità del sistema di ventilazione in queste strutture impedisce il surriscaldamento dei server, ma presenta nuove sfide per la compartimentazione tagliafuoco e le barriere antifiamma e per il controllo ed il contenimento della propagazione del fuoco. Complice il rapido progresso della tecnologia, nuove sfide antincendio interessano gli operatori del settore. È impegnativo per le normative antincendio tenere il passo con queste nuove tecnologie. Il ruolo dell'ingegnere antincendio è capire, anticipare e reagire a queste innovazioni per assicurare che siano

opportunamente considerate durante la progettazione.

La partecipazione di ingegneri antincendio qualificati diventa cruciale per questi progetti. Gli ingegneri antincendio sono capaci di individuare opportunità dove un semplice approccio prescrittivo non fornisce la miglior soluzione e soluzioni alternative economiche diventano possibili senza compromettere la sicurezza.

Analogamente, le normative antincendio esistenti potrebbero non risolvere adeguatamente i rischi. Pertanto, un approccio prestazionale dovrebbe essere considerato ed effettuato da ingegneri antincendio competenti per attenuare i rischi presenti durante la progettazione delle strutture.

L'utilizzo di formati e qualificati ingegneri durante le prime consultazioni di progettazione è un modo efficace per assicurarsi che la strategia antincendio abbia un minimo impatto sulla progettazione e sui costi del progetto, mentre potenziali ritardi del programma prefissato e la necessità di retrospettivi cambiamenti siano ridotti.

Inoltre, diventa fondamentale la collaborazione tra gli ingegneri antincendio e le autorità competenti. Gli ingegneri antincendio dovrebbero impegnarsi con le

autorità (Vigili del fuoco e entità statali competenti) riguardo le specifiche sfide associate alle tecnologie dei data centre, mentre i requisiti e gli obiettivi del cliente vengono incorporati nella strategia antincendio. Contemporaneamente, gli ingegneri antincendio dovrebbero ascoltare e capire le potenziali preoccupazioni delle autorità e soprattutto le necessità che i Vigili del fuoco potrebbero avere quando chiamati ad intervenire per questi edifici.

LE SFIDE PER LA PROGETTAZIONE ANTINCENDIO

In risposta all'incremento della domanda, in tutto il mondo si stanno realizzando numerose costruzioni di strutture di data centre.

Inoltre, le principali aziende di costruzione e di IT sono costantemente alla ricerca di nuove tecnologie personalizzate per l'industria dei data centre.

Mentre da una parte questo nuovo mercato si sta evolvendo a ritmi incredibili, dall'altra parte le normative tendono ad evolversi ad un ritmo più lento, rendendo difficoltosa l'evoluzione in parallelo con la rivoluzione emergente di questa industria.

Nelle normative non si riscontrano numerose problematiche. Spesso quanto richiesto per il funzionamento di queste strutture contrasta con le raccomandazioni delle normative locali per la salvaguardia della vita.

Quanto segue mostra alcune delle principali sfide riscontrate durante la progettazione di numerose strutture data centre.

HYPERSCALE DEI DATA CENTRE

Vista la notevole velocità del mondo dei dati, i giganti del tech hanno internamente elaborato una versione ideale della progettazione dei loro data centre con attenzione alle principali caratteristiche necessarie per l'operazione della struttura. Queste caratteristiche della struttura devono essere incorporate nel progetto per ottenere un efficiente flusso di lavoro indipendentemente dalla posizione geografica della struttura. Ma tale progetto, seppur ideale, ha la necessità di confrontarsi e di considerare necessariamente le normative locali. L'ingegnere antincendio deve adattare questo progetto ideale al contesto

locale, senza però alterare la funzionalità della struttura. Le raccomandazioni dettate dalle normative locali variano tra le diverse giurisdizioni. Per questo motivo, il progetto ideale del data centre è di solito adeguato al contesto della posizione geografica dove la struttura sarà costruita, mantenendo la desiderata efficienza del flusso di lavoro.

Per esempio, la planimetria di data center è spesso dotata di larghi spazi contenenti attrezzature IT. Diverse normative locali limitano le dimensioni degli spazi dei compartimenti tagliafuoco per circoscrivere la propagazione del fuoco in caso di incendio.

In alternativa, una soluzione comune a questo problema sarebbe l'installazione di sistemi per il controllo del fumo per garantire i larghi spazi.

Tuttavia, entrambe queste potenziali soluzioni potrebbero non essere possibili per via del conseguente impatto sulla progettazione della struttura alterando l'efficienza richiesta. Quindi, soluzioni alternative di prevenzione incendi potrebbero essere necessarie per ottenere e dimostrare un livello di sicurezza antincendio equivalente ai codici locali di prevenzione incendi.

LE FASI DI COSTRUZIONE

Visti i sostanziali impatti finanziari inerenti a queste strutture e l'elevata domanda per disponibilità, una rapida praticabilità della struttura è essenziale per il cliente.

La costruzione di queste strutture è spesso divisa in diverse fasi per ottimizzare il tempo necessario per la costruzione e la operatività della struttura.

La progettazione deve essere sviluppata assicurandosi che la prima sezione di struttura costruita sia pronta per l'operazione mentre le rimanenti porzioni della struttura sono in costruzione.

Pertanto, ogni sezione delle fasi di costruzione deve essere progettata in modo dettagliato così che sia la conformità con il Codice di Prevenzione Incendi che l'efficienza della struttura siano ottenute in tutte le fasi della costruzione (per esempio, ogni singola sezione di struttura e l'intera struttura). Gli

occupanti potrebbero incontrare ostacoli durante l'esodo (potenziali barriere dovute all'ambiente dinamico del cantiere) e metodi di discesa poco stabili (scale a pioli o scale di impalcatura) nel tentativo di avere un esodo rapido ma non pericoloso [8].

I SISTEMI DI GRUPPI DI CONTINUITÀ

Sistemi di gruppi di continuità sono installati per aumentare la resilienza alla perdita di elettricità nelle strutture dei data centre fino a quando i generatori sono operativi. Questi sistemi sono generalmente conosciuti nel settore (in lingua inglese) come Uninterruptible Power Supply (UPS).

Questi sistemi sono di solito alimentati da batterie a VRLA (Valve-Regulated-Lead-) e da batterie agli ioni di litio (LIB, lithium-Ion Battery). L'uso della tecnologia LIB è stato riscontrato nella maggior parte dei progetti passati. Ci sono diversi tipi di LIB e la tecnologia si sta continuamente evolvendo per soddisfare la domanda in aumento per i crescenti requisiti per la prestazione elettrochimica e per la sicurezza. Il famoso elemento dell'attuale LIB è l'elettrolito che è una miscela di solventi organici combustibili.

La fuga termica (thermal runaway) è il principale rischio di incendio per LIB, visto che danni meccanici (danni fisici), elettrici (guasto del sistema di gestione della batteria), o termici (guasti del sistema di gestione della temperatura), possono causare un incendio auto sostenibile che propaga verso le celle di batteria adiacenti.

Come dimostrato in Figura 4, la fuga termica (or Internal Short-Circuit) potrebbe anche essere determinata da diverse altre cause come dimostrato da UL9540A [9]. Questo può causare una rapida espansione dell'incendio e lo sfogo di gas tossici e combustibili nell'ambiente. Questi gas potrebbero infiammarsi e causare un incendio, o accumularsi per poi diventare potenzialmente esplosivi, se non correttamente presi in considerazione.

Gli incendi causati da LIB sono particolarmente impegnativi da sopprimere, visto che la riaccensione può verificarsi se il

calore non è rimosso dalle batterie compromesse.

Pertanto i metodi di spegnimento, devono rimuovere con efficienza il calore dalle batterie per evitare la propagazione di fuga termica alle celle di batteria vicine.

Anche se i sistemi di spegnimento incendio senz'acqua possono essere efficienti nello spegnere l'incendio iniziale, non sono però capaci di rimuovere il calore dalle batterie e quindi non riescono ad evitare la propagazione della fuga termica.

Quindi, con l'uso di sistemi di spegnimento che non utilizzano acqua, l'incendio iniziale può essere spento, ma la riaccensione può avvenire laddove il fenomeno della fuga termica non sia stato interrotto.

Per questo motivo, al momento, è preferibile un sistema di spegnimento ad acqua, vista l'efficacia nel rimuovere il calore e mitigare la propagazione del fenomeno di fuga termica [10].

Comunque, gli impianti sprinkler hanno uno scarso potere di penetrazione nelle celle per via dello scudo creato dall'involucro delle batterie.

Inoltre, l'acqua può danneggiare il materiale elettronico in quell'area.

Un sistema di sprinkler richiede l'installazione di un sistema di drenaggio. Sarà altresì necessaria un'analisi dettagliata per uno smaltimento a norma dell'acqua potenzialmente contaminata dalle sostanze chimiche rilasciate dall'UPS.

Nessun particolare tipo di sprinkler (per esempio, umido, pre-action, nebbia d'acqua, etc.) è previsto negli standard internazionali. Ognuno di essi ha i propri vantaggi e svantaggi.

Lo sprinkler a umido pone dei rischi per la costante presenza di acqua nelle tubature. Questo potrebbe causare danni al materiale IT nel caso di un guasto alle tubature.

Invece il sistema pre-action ha tubature a secco (no acqua nella struttura) e l'acqua viene rilasciata con un leggero ritardo, dovuto

al riempimento delle tubature su attivazione, permettendo una crescita dell'incendio e causando danni indesiderati.

L'attuazione dei sistemi antincendio per LIB spesso rientra nella sfera delle normative locali sulla tutela della salute e sicurezza.

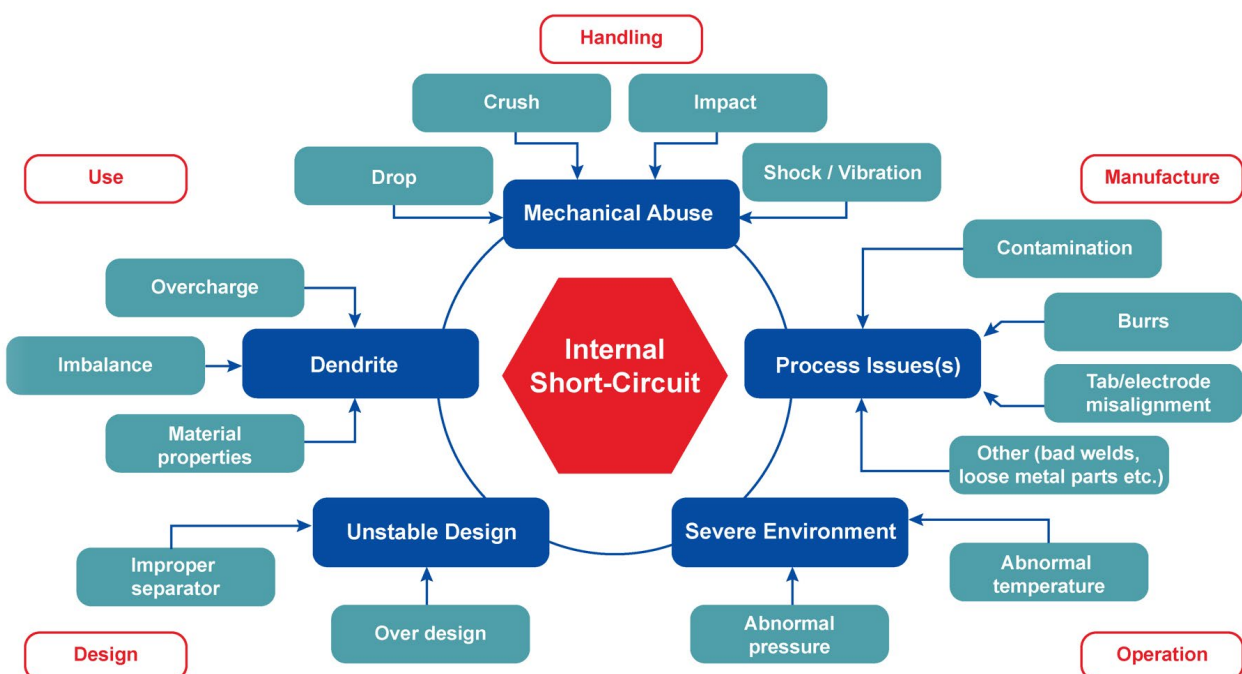
Al momento, i requisiti in linea con le normative locali non considerano il rischio dovuto alla presenza di LIB. Quindi, la selezione delle corrette misure per mitigare i rischi dovuti all'installazione di LIB deve essere valutata nel contesto della struttura in cui saranno installate.

Sono disponibili poche guide internazionali che affrontano l'argomento UPS. Anche se in America sono utilizzati UL standard, in Europa, in alternativa ai test europei viene utilizzato l'UL test del LIB.

UL 9540A [9] esamina il rischio della fuga di calore del UPS. I risultati generati da questo test vengono usati per accertare la previsione di sistemi di sicurezza necessari per la batteria.

Anche NFPA ha pubblicato uno standard NFPA 855 [11] che fornisce una guida per la progettazione e costruzione di batterie di diverse tecnologie sia interne che esterne all'edificio come dimostrato in Figura 5. NFPA 855 [11] consiglia l'utilizzo di sistemi per l'esplosione e la fuga termica per la maggioranza delle tecnologie UPS. La distribuzione e la quantità di gas rilasciati da tali batterie è generalmente infiammabile e tossica. La comprensione del processo chimico e dei gas con le loro proprietà è fondamentale per la sicurezza.

Le recenti UPS includono sistemi di sicurezza per evitare la fuga termica. Comunque, la sicurezza dei sistemi UPS è in continua evoluzione. Gli ingegneri antincendio dovrebbero avere una chiara comprensione del comportamento del sistema UPS durante l'incendio. La strategia antincendio cambia per ogni data centre. Tale strategia, infatti, dipende dall'ubicazione, dai target di performance e dalla tolleranza del rischio di continuità di operazione.



Compliance Required	Battery Technology				Sodium Nickel Chloride	Other Electrochemical ESS and Battery Technologies ^b
	Lead-Acid	Nickel ^a	Lithium-Ion	Flow		
Exhaust ventilation	Yes	Yes ^c	No	Yes	No	Yes
Spill control	Yes ^d	Yes ^d	No	Yes	No	Yes
Neutralization	Yes ^d	Yes ^d	No	Yes	No	Yes
Safety caps	Yes	Yes	No	No	No	Yes
Thermal runaway	Yes ^e	Yes	Yes ^f	No	Yes ^f	Yes ^f
Explosion control	Yes ^g	Yes ^g	Yes	No	Yes	Yes
Size and separation	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

La costruzione di pannelli di parete composito Il sistema di divisione di pannelli di parete composito, conosciuti come whitewall, è un economico ed efficiente strumento per costruire divisioni che possono essere sia verticali che orizzontali. Tale strumento è altresì idoneo per l'uso in ambienti igienici e con temperature controllate, come i data centre.

I pannelli di parete composito sono generalmente composti di acciaio con una scelta di finiture rivestite dipendenti dall'uso. Sono anche usati per le divisioni resistenti al fuoco.

Questo pannello è comunemente usato nei data centre come metodo alternativo di divisione. A causa della natura della struttura, le pareti sono perforate da svariati impianti (come portacavi, tubature, condutture e porte). Visto l'incremento dell'uso di questi pannelli nei data centre, la tecnologia di pannelli di parete composito si è sviluppata ed è migliorata per soddisfare i requisiti (per esempio grandi numeri di perforazione di impianti). È fondamentale assicurarsi che i materiali utilizzati siano capaci di raggiungere le prestazioni desiderate in caso di incendio ed è essenziale che i materiali e i prodotti siano simili a quelli testati. Comunque, i test antincendio per questi pannelli insieme alle numerose perforazioni sono ancora prematuri. Questo rappresenta un gap per la certificazione antincendio dei pannelli di parete composito con perforazioni.

Le normative tipicamente richiedono che i prodotti siano correttamente testati e certificati in condizioni di incendio.

All'esito dei relativi test, saranno disponibili estese applicazioni (Exaps) del prodotto testato. Ciò permette di ampliare l'utilizzo del prodotto stesso.

Metodo alternativo alle predette estese applicazioni, è l'analisi ingegneristica, capace di colmare le lacune del test. Tale analisi è meglio conosciuta come *Engineering Judgement*.

L'analisi ingegneristica, seppur non conforme con i test di prodotto e/o con le citate estese applicazioni, si basa sui singoli risultati scaturenti dall'analisi dei singoli prodotti.

Queste *analisi* dovrebbero solo esser effettuate da persone che sono qualificate e hanno esperienza nel campo dei test sui prodotti, ma dovrebbero essere usate con cautela e supportate da valutazioni quantitative.

L'analisi ingegneristica è stata spesso utilizzata, in passato, col dichiarato fine di superare le incongruenze dei test standardizzati. È importante però chiarire che tale analisi ingegneristica non è accettata dalle autorità governative locali.

Pertanto, i produttori stanno sviluppando diversi test per ottenere la conformità con gli standard dei test antincendio.

Questo gap dei test deve essere analizzato e ben compreso dagli ingegneri antincendio durante lo sviluppo dei progetti di data centre. In assenza di una corretta valutazione potrebbero verificarsi ritardi rilevanti nella fase di costruzione e conseguenti danni economici.

L'ARCHITETTURA INGEGNERIZZATA

Contrariamente a molti tipi di costruzioni, i data centre sono progettati con architetture ingegnerizzate (engineered architecture). Visto che questi edifici sono grandi strutture industriali, le discipline di ingegneria (come elettrica, meccanica e antincendio) ne guidano la progettazione.

Mentre l'architettura adatta e segue le richieste dell'ingegneria, tali richieste necessitano della partecipazione dell'ingegnere antincendio per assicurare che i principali obiettivi siano raggiunti.

Le strutture dei data centre consumano grandi quantità di energia per le loro operazioni h 24/7. Il potenziale evento di blackout pone una seria minaccia per l'edificio. Pertanto, per ogni data centre vengono forniti sistemi di backup.

Questi sistemi di backup sono composti da un grande numero di trasformatori e generatori. Generatori alimentati da diesel sono generalmente scelti per la semplicità del rifornimento e la disponibilità del diesel. Sono tipicamente posizionati vicino al data centre per fornire i servizi essenziali. La presenza di grandi serbatoi di diesel e di attrezzature elettriche vicino al data centre pone un aumento del rischio di propagazione dell'incendio se le distanze minime non sono rispettate.

Per questi motivi deve essere sviluppata un'avanzata e dettagliata progettazione di protezione passiva e attiva per evitare qualsiasi rischio alla vita e ai beni, considerando le distanze con gli altri edifici e le numerose perforazioni di impianti nel data centre.

Visto che per l'attività del data centre sono necessari molti edifici sussidiari, dall'esterno sono presenti numerose perforazioni.

Se larghe porzioni della facciata dell'edificio sono occupate dal sistema di ventilazione, rimane poco spazio per la posizione delle perforazioni degli edifici di supporto. È necessario un coordinamento tra i diversi professionisti al fine di non intaccare le strategie di compartimentazione tagliafuoco, esodo e propagazione di incendio dall'esterno.

I data centre contengono grandi numeri di server che lavorano costantemente, quindi potenti sistemi di ventilazione sono costantemente in funzione per evitare il surriscaldamento dei server. Il surriscaldamento è un serio rischio per questi edifici e può causare notevoli perdite finanziarie e di dati. I sistemi di ventilazione sono progettati per funzionare fino alla distruzione per evitare surriscaldamento anche in caso di incendio. Come risultato di questa strategia, grandi plenum aerulici formano grandi cavità che attraversano estese aree dell'edificio finendo all'esterno. Se non accuratamente considerate, questo crea un rischio per invisibili propagazioni di incendio/fumo tra le diverse aree dove vengono installate tipicamente barriere tagliafuoco per suddividere questi grandi spazi e il sistema di ventilazione viene spento in caso di incendio.

È necessario sviluppare:

- una dettagliata strategia di compartimentazione tagliafuoco;
- un'analisi del rischio;
- dei sofisticati impianti alternativi di rilevamento e spegnimento incendio, al fine di attenuare i rischi, ottenendo la sicurezza desiderata senza intaccare il funzionamento della struttura.

SICUREZZA VS. ESODO

È fondamentale, per la moderna economia digitale, una continua ed affidabile accessibilità ai dati: ciò meglio spiega quanto i data centre siano fondamentali per le infrastrutture dei paesi.

Sistemi resilienti e sicuri sono fondamentali per operatori con clienti che richiedono estrema sicurezza. Robusti sistemi di sicurezza sono necessari per sostenere minacce in ogni momento.

Considerando i ristretti accessi e l'alta sicurezza dell'edificio, le misure di sicurezza contrastano con i requisiti necessari per l'esodo. Anche se viene confermato un incendio nell'edificio, solo determinate porte saranno aperte e disponibili per l'esodo.

Quali porte devono essere aperte?

Come si possono considerare le caratteristiche degli occupanti nella fase di esodo?

Queste porte sono abbastanza per garantire un esodo sicuro?

Un dettagliato coordinamento tra i diversi design team è fondamentale per sviluppare la “cause and effect matrix” e predefiniti piani di sicurezza in caso di incendio.

Questi devono essere elaborati per garantire una via di esodo sicura per le persone in caso di incendio.

LO SVILUPPO DI TECNOLOGIE FUTURE

I giganti del tech sono una buona parte delle più importanti aziende del mondo e la recente pandemia ha contribuito ad aumentare l'importanza di tali aziende. Buona parte della società è profondamente dipendente dagli ambienti digitali e l'industria dell'IT e l'ingegneria stanno evolvendo ad una velocità mai vista. Queste nuove tecnologie continueranno a porre nuove sfide per la progettazione della sicurezza antincendio dei data centre. I seguenti sono solo alcuni dei futuri approcci alternativi all'orizzonte per l'industria dei data centre:

- *Data Centre con più livelli*

Molti edifici di data centre sorgono fuori dalle grandi città con bassi costi per l'immobile, usando la veloce rete comunicativa. Comunque, questo sta cambiando.

Molti giganti del tech vogliono bassa latenza (minimo ritardo tra input dell'user e risposta dal cloud) per le applicazioni usate dai lavoratori nelle città, richiedendo che questi edifici siano posizionati all'interno delle grandi città.

Il risultato è la nascita di data centre sviluppati su più livelli.

Nel 2011, una proposta per la ristrutturazione di 100mila mq di spazio di data centre fu presentata per alcuni piani di un iconico edificio esistente (Verizon Building) in New York City centro. Però, la proposta non fu

accettata per via dei rischi posti per i rimanenti livelli e i potenziali problemi della posizione centrale nella città.

Inoltre, Huawei e Keppel Data Centre hanno aderito al Info-communications Media Development Authority of Singapore (IMDA) per sviluppare uno studio di praticabilità su un grattacielo “green” per data centre. Il governo di Singapore sta studiando la possibilità di costruire un edificio di data centre di 20 livelli.

Questa evoluzione scatenerà diverse sfide per la progettazione antincendio e molteplici domande stanno nascendo nella comunità. Nel caso in cui un data centre occupi solo alcuni piani di un grattacielo, ci si interroga su come garantire la sicurezza dei restanti piani. Ed in particolare ci si chiede come far interagire i diversi livelli, i generatori a diesel, i trasformatori e i sistemi di batterie che saranno installati in maniera sicura nel grattacielo.

- *Sistemi UPS*

Batterie elettrochimiche e chimiche sono in continua evoluzione. Nel processo di ricerca per un futuro uso, ci sono diverse tecnologie di batteria.

Una delle più gettonate è la batteria a litio-aria. La differenza dalle attuali LIB, è che la reazione di ossidazione usata per rilasciare gli elettroni si realizza tramite l'utilizzo dell'ossigeno nell'atmosfera. Però, ci sono diversi processi chimici che dovrebbero essere controllati e sono oggetto di ricerca al momento [12]. Le tecnologie delle batterie e i loro livelli di sicurezza molto probabilmente varieranno nel futuro. Le misure di mitigazione del rischio incendio dei data centre con batterie dovrebbero considerare il potenziale impatto sul cambiamento della chimica nella batteria.

L'idoneità e l'analisi costi-benefici delle misure potrebbe essere necessaria. Queste incertezze scatenano molteplici domande, come:

“Vista questa continua evoluzione di tecnologie, è possibile progettare un

edificio contenente batterie che non sono state ancora sviluppate? E se la prossima tecnologia porrà più severi rischi di incendio ed esplosione? È possibile rinnovare gli impianti degli edifici insieme alle batterie?”

- **Sostenibilità-**

Anche se l'accordo green europeo ha il 2050 come obiettivo per la neutralità di carbonio, l'operazione globale di Facebook punterà ad ottenere net-zero emissioni di carbonio per il 2030 [13].

Tutto nelle nostre vite sembra essere nel cloud, ma in realtà gli edifici sono pieni di file e l'aria condizionata è necessaria per mantenere una temperatura ideale. Al momento, gli edifici di data centre hanno un enorme impatto ambientale, dal consumo di energia e acqua all'emissione di greenhouse gas.

Si stima che in Irlanda, i data centre utilizzeranno il 29% dell'intera elettricità consumata in Irlanda nel 2028 [14]. Tra le attuali tecnologie usate per ottenere un impatto green, c'è l'installazione di pannelli fotovoltaici per energia e limitata installazione di area di green roof per la gestione dell'acqua piovana, isolamento e miglioramenti nella qualità dell'aria.

Molti dei giganti del tech non solo stanno puntando ad un data centre sostenibile, ma guardano sempre più interessati agli edifici rigenerativi. Un'economia completamente carbon-free permetterebbe di assicurare che i data centre abbiano un positivo impatto nel mondo durante queste crisi di cambiamento climatico. Numerose tecnologie rinnovabili sono usate per ottenere questo obiettivo, come l'uso di idrogeno, pannelli fotovoltaici, alternativi sistemi di ventilazione e installazione di numerosi green roof/wall. Queste tecnologie porranno altre sfide per la progettazione antincendio di questi edifici. Come si può usare l'idrogeno in maniera sicura? Alternativi sistemi di ventilazione causeranno problemi per la strategia di compartimentazione antincendio? Come possiamo avere molteplici installazioni di green roof/wall in un edificio e mitigare i rischi?

Queste nuove tecnologie sono solo alcune delle molteplici tecnologie che sono ancora in fase di ricerca. Anche se l'installazione di queste nuove tecnologie potrebbe risolvere alcuni problemi, potrebbero presentarsi nuove sfide per la sicurezza antincendio. Queste necessitano una chiara comprensione di soluzioni innovative da parte degli ingegneri antincendio per mitigare i rischi. Il ruolo dell'ingegnere antincendio è di comprendere, anticipare, e reagire a queste innovazioni per assicurare che sia sviluppata una corretta progettazione di sicurezza antincendio. Questo deve essere considerato non solo durante la fase di progettazione dell'edificio, ma per tutta la durata della sua vita, anche quando è sottoposto a rinnovamenti.

CONCLUSIONI

Durante questo momento storico dell'“Internet of Everything” e l'inizio di una potenziale era delle pandemie, internet e le tecnologie stanno aiutando le persone ad affrontare numerose problematiche. Questo è risultato di una crescita esponenziale dei giganti del tech e rappresenta una notevole domanda per le loro risorse. Con questo cambiamento per le persone e il business, la richiesta di data centre sta crescendo rapidamente per la memorizzazione di dati e funzionamento di website e applicazioni.

Anche se i data centre erano presenti prima di questa rivoluzione, molte caratteristiche di questi edifici sono state alterate a causa dell'avanzamento della progettazione dell'edificio, tecnologie ed efficienza del flusso di lavoro.

Come conseguenza alla notevole richiesta di data centre da parte dei giganti del tech, i leader di tecnologie e compagnie di costruzione, hanno sviluppato dettagliati prodotti da utilizzare nei data centre.

Queste nuove tecnologie., insieme alle sfide dei data centre, presentano nuove complicazioni per la sicurezza antincendio. Queste complicazioni sono spesso aggravate dalla mancanza di normative locali e certificazioni di test antincendio. Inoltre, si prevede che la crescita dei data centre e dell'industria che li circonda, crescerà ancor

più nel prossimo futuro. Quindi, lo sviluppo di nuovi edifici e tecnologie IT presenteranno nuove sfide per la sicurezza antincendio.

A causa di queste nuove sfide e della insufficienza di standard internazionali capaci di regolare tutti gli aspetti per la costruzione e progettazione dei data centre, sarà cruciale per la progettazione degli edifici esistenti e di quelli futuri, l'analisi della sicurezza antincendio. Inoltre, gli ingegneri antincendio dovrebbero impegnarsi con le autorità (Vigili del fuoco e entità del governo) per identificare gli obiettivi dei data centre e delle sfide connesse alla funzionalità dell'edificio, e allo stesso momento comprendere e includere gli obiettivi del cliente nella strategia antincendio. Questo dovrebbe risultare da una chiara e dettagliata conoscenza della vita dell'edificio da un punto di vista olistico dell'ingegneria, mentre dovrebbe essere garantito un procedimento approvato da tutti gli enti coinvolti.

Questo articolo evidenzia le principali nuove sfide antincendio incontrate durante la progettazione di diversi data centre.

Mentre i requisiti prescrittivi per la sicurezza delle persone sono spesso chiari, diversamente i requisiti del cliente per la continua operazione di questo edificio contrastano diversi principi della strategia della sicurezza antincendio.

Le sfide elencate nascono dalle passate esperienze lavorative nei data centre, ma la lista non è esaustiva.

Sebbene non esistano chiare soluzioni adottabili per ogni progetto, per ognuna delle sfide sopraelencate, è essenziale che gli ingegneri antincendio comprendano il corretto funzionamento dell'edificio e i suoi sistemi e la strategia proposta.

La progettazione della sicurezza antincendio per data centre, come per tutti gli edifici, non può essere semplicemente sviluppata seguendo alla lettera le normative locali. Un'approfondita comprensione e analisi sono essenziali per lo sviluppo di un solido ed efficiente design dell'ingegneria antincendio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. R. a. E. O.-O. Max Roser, «Our World in Data,» 2015. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/internet>.
- [2] B. Marr, «How Much Data Do We Create Every Day? The Mind-Blowing Stats Everyone Should Read,» Forbes, [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/05/21/how-much-data-do-we-create-every-day-the-mind-blowing-stats-everyone-should-read/?sh=5dc1222560ba>.
- [3] Cisco, «What is a Data Center,» Cisco, [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/data-center-virtualization/what-is-a-data-center.html>.
- [4] G. V. R. «Data Center Power Market Size, Share & Trends Analysis Report by Product (PDU, UPS, Busway),By End Use (IT & Telecom, BFSI, Energy, By end Use (IT & Telecom, BFSI, Energy, Healthcare, Retail), By Region, and Segment Forecasts, 2019-2025,» 2019..
- [5] T. V. O. I. «Average Cost of a Data Center Outage,» Data Center Frontier, 2016. [Online]. Available: <https://datacenterfrontier.com/average-cost-of-a-data-center-outage/>.
- [6] B. Elliott, «The importance of fire engineering in a data centre,» TECHERATI, 23 Feb 2016. [Online]. Available: <https://www.techerati.com/the-stack-archive/data-centre/2016/09/23/the-importance-of-fire-engineering-in-a-data-centre/>.
- [7] A. Harrison, «Data centres and technology,» Arup, [Online]. Available: <https://www.arup.com/expertise/industry/science-industry-and-technology/data-centres>.
- [8] L. M. H. S. D. E. R. G. «Fire safety in construction: Site evacuation and self-reported worker behaviour,» *Safety Science*, vol. 145, p. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105482>, 2022.
- [9] UL, «UL 9540A 'Standard for Test Method for Evaluating Thermal Runaway,» 2019.
- [1] DNV.GL, «144K9C7-12 - Maritime Battery Safety 0] Joint Development,» 2019.
- [1] NFPA, «NFPA 855 'Standard for the Installation of 1] Stationary Energy Storage Systems',» 2020.
- [1] A. K. e. a. «Review on Li-air batteries - Opportunities, limitations and perspective,» *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 886-893, 2011.
- [1] Facebook, «Facebook's Net Zero Commitment,» 3] Facebook Sustainability, 2020.
- [1] M. Boran, «The true carbon cost of feeding the data centre monster,» The Irish Times, 2020. [Online]. Available: <https://www.irishtimes.com/business/technology/the-true-carbon-cost-of-feeding-the-data-centre-monster-1.4236923>.

THE NUMEROUS FIRE SAFETY CHALLENGES OF DATA CENTRE DESIGN

AUTHOR: Pasquale Iovino, Fire Safety Engineer at Arup, Dublin, Ireland

BIO

Pasquale graduated from the International Master of Science in Fire Safety Engineering (IMFSE) program organized by three universities in Europe and UK. He has been working as a fire safety consultant at Arup since 2017 in both Dublin and New York offices. During his time with Arup, he has worked on large international projects across Europe, UK, the Americas and Australasia. He has worked on international prescriptive design projects for a variety of buildings that employed numerous international codes, standards, and guidelines. He also specialises in the use of performance-based design approaches with quantitative and qualitative risk assessments, Computational Fluid Dynamics, and egress simulations. In his time in the United States, he also gained extensive knowledge designing active fire protection systems in accordance with insurance and international guidelines.

ABSTRACT

We are in the 4th Industrial Revolution: The Internet of Things. The explosion of technology into our lives is driving change at a ferocious rate, fundamentally changing the way in which we live, work, and interact. This exponential increase in data has also driven a growing demand for data centre facilities.

Data centres are designed to host a low number of occupants with a significant amount of IT equipment. Besides the life safety requirements outlined within fire safety regulations, business continuity and property protection are to be considered within the design due to the potentially large economic and reputational damage that could be caused by a business interruption.

The following article focuses on the fire safety challenges encountered when designing a data centre facility as well as the perceived future challenges in this field.

INTRODUCTION

In the wider context of the global internet story, it is still in its infancy, however even now many people cannot imagine their lives without all the services provided by internet. Globally, the number of internet users increased from 413 million in 2000 to over 3.4 billion in 2016. In the past 5 years, there were 27,000 people online for the first time every hour [1]. In addition, as a result of the Coronavirus pandemic the business needs to shift towards a cloud based workspace has been accelerated. This cloud based revolution has ensured work continuity for businesses at any time while being remote. Every day there are 2.5 quintillion bytes (or exabytes) of data created and 90% of all data in the world has been generated over the last 2 years [2]. This daily data production equals to 625 million DVDs worth of information. These numbers are only expected to increase in the future. A large proportion of the data storage market is dominated by few players, generally referred to as tech giants.

With this seemingly relentless revolution, the demand for data centre construction is increasing globally. Figure 1 and Figure 2 present the data centre distribution among top countries at the beginning of 2021. At its simplest, a data centre is a highly secure physical facility that organizations use to house their information and data. A data centre's design is based on a network of computing and storage resources that enable the delivery of shared applications and data [3]. Together, they provide:

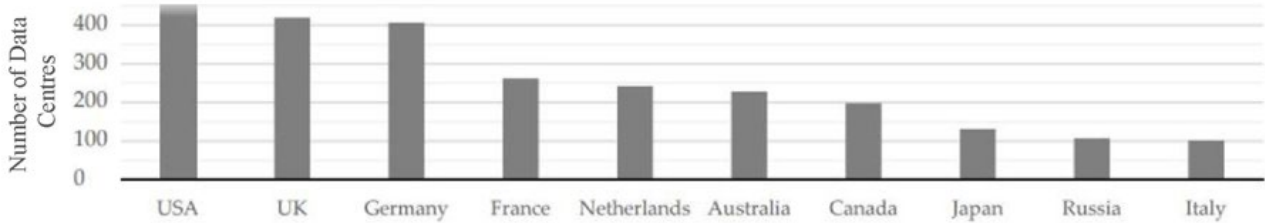
- **Network infrastructure-** This connects servers, data centre services, storage to the end-user.
- **Storage infrastructure-** Data is the means of data centres and storage systems are used for this valuable commodity.
- **Computing resources-** Applications are the engines of a data centre. These servers provide the processing, memory, and local storage.

Due to the specific function of the data centre building, each of the tech giants have their own design for efficiency. Complex electrical and mechanical systems enable the building operation. For this reason, these disciplines

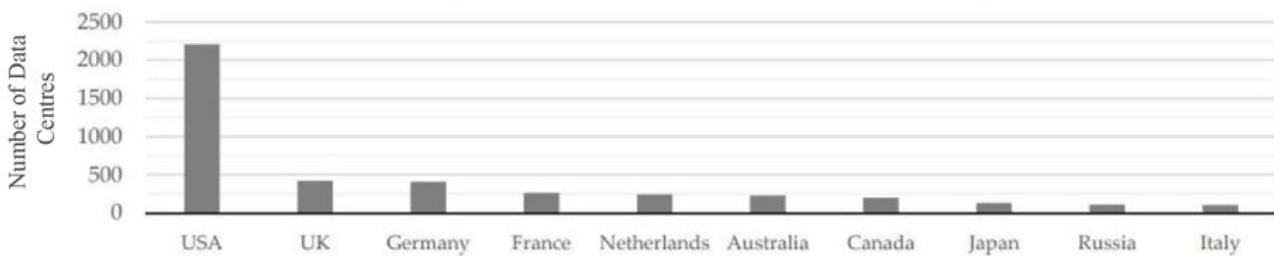
act as the engineered architecture leading the design.

Note that while the following article is based on project experience across a number of regions, due to confidentiality requirements no case studies or case figures will be included. This article aims to shed light on the “atypical” fire engineering challenges encountered during the design of data centre buildings. While the life protection design for this type of

building is reasonably straightforward, significant fire safety challenges can be created by the building functionality, property protection requirements and the technologies used within e.g. battery storage systems. Although there are no straightforward solutions for each of the challenges, fire engineers can work towards detailed and innovative performance-based designs to address them.



[4]



[4]

Typical Data Centre Building Requirements

As discussed, there are several unique aspects to the functionality of a data centre building which present challenges to the fire engineer. These aspects are linked to the business continuity demand from the Client. Any type of business interruption can cause great financial and reputational damage. Therefore, minimizing property damage and business interruptions in case of an emergency are imperative. Fire safety design, both active and passive, is to be specifically tailored to achieve these goals. Figure 3 shows that the cost of partial and total per single shutdown of data centres has been increasing over the last few years. This is due to the fact that internet has become an essential tool for commerce. In just one day over \$2 billion of commerce occurs online in the world [5]. A small data centre outage may result in serious implications as these examples illustrate.

1. In August 2016 a small fire at the Delta Airlines Atlanta data centre caused a power cut resulting in the cancellation of 2,300 flights and disruptions of many more. The revenue loss of this outage has been estimated to be \$100 million [6].
2. In July 2016, the main data centre for the Canadian government was shut down due to smoke from a small fire. This resulted in 50,000 government workers lost emails and 80,000 payroll transactions delayed [6].

To guarantee business continuity, the following building requirements should be considered when designing fire safety solutions for data centre buildings:

- **24/7 operation-** Data centre buildings are required to function 24/7 throughout the year with programmed regular maintenance to avoid service interruptions. For this reason, cooling

ventilation systems are required to be run even in a case of emergency, such as fire.

- **Security-** Due to the sensitivity of the data stored within these facilities, a high level of security is required to avoid non-authorized entry. This level of security is generally required to be maintained even during emergency events (e.g. a fire).
- **Sustainability-** The data centre sector is expected to account for around 3.5% of global carbon emissions by the end of 2021 – a larger contribution than aviation [7]. Data centre facilities require enormous quantities of primary resources to operate (i.e. water and energy). Hence, facility design is deeply concentrated on water usage, energy consumptions, and carbon emissions with the goal to not only reduce

their impact on the environment but also to help other sectors, such as by waste heat recycling.

- **Facility Efficiency -** As a result of the speed of the data world, an optimized data centre design is produced by each of the tech giants. The optimized design is to meet the high efficiency standard desired. This design often challenges the fire safety regulation recommendations with regards to fire compartmentation (i.e. compartment size above life safety recommendations limit) and active fire protection (i.e. low efficiency of typical detection system). Therefore, performance-based design is generally utilized to justify these non-compliant provisions and ensure that sufficient level of fire safety is achieved.

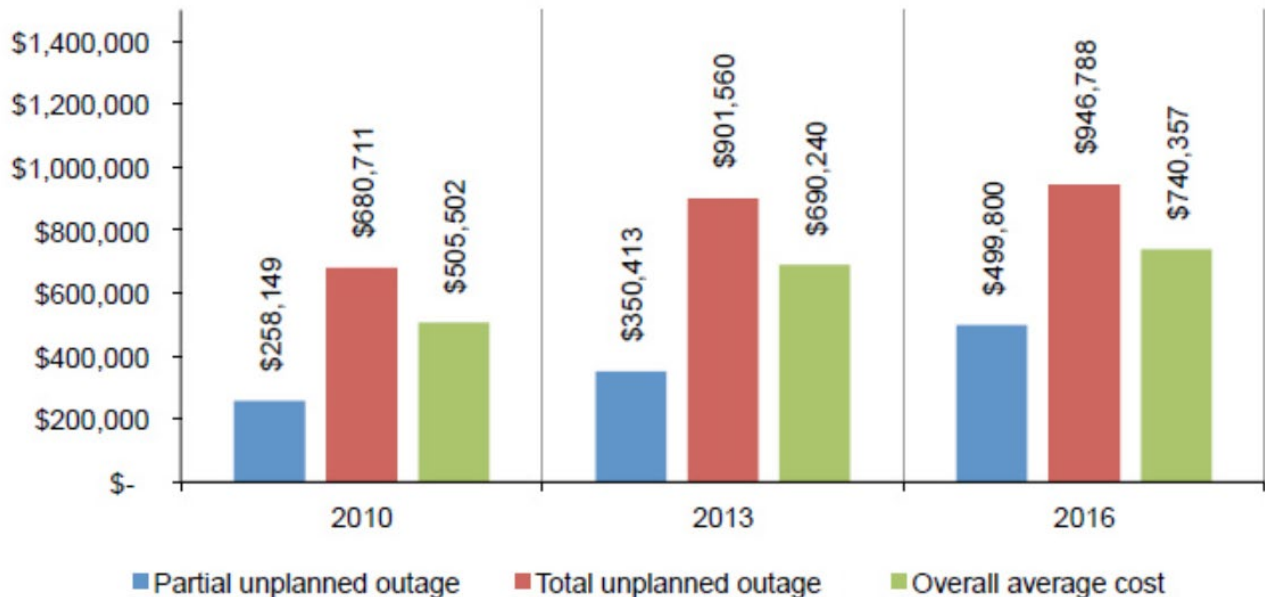


Figure 3 Average Cost for Single Data Centre Outage [5]

The Importance of Fire Engineer Involvement
Data centre facilities are unique constructions with new challenges. Often due to the nature of the data stored in the facility and the need for business continuity and even specific security requirements, the building fire strategy provisions far exceed, and at times conflict with, the local life safety fire code requirements.

This industry is constantly innovating in pursuit of environmental, economic, technological and construction efficiency. New materials and equipment utilised within data centre buildings

(i.e. whitewall partitions and photovoltaic panels) may solve one set of challenges with respect to building efficiency but present an entirely new set of challenges to the fire engineers. For example, the continuous cooling system within these buildings do prevent server overheating but it presents issues with regards to fire compartmentation and cavity barriers to limit fire spread. With rapid development in technologies, new fire safety challenges are being encountered. It is challenging for fire safety regulations and guidance to keep up with the pace of these new technologies. It is the role of the fire

engineer to understand, anticipate and react to these innovations to ensure that they are suitably considered in the design.

The involvement of qualified fire engineers becomes crucial on these projects. Fire engineers are capable of identifying opportunities where a basic prescriptive approach does not provide the best value, and alternative cost-effective solutions are possible without compromising on safety. Similarly, existing fire safety codes may not adequately address the risks presented. Therefore, performance-based design should be considered and carried out by competent fire engineers to mitigate the risks within the buildings while achieving the fire safety objectives outlined within the local regulations.

The inclusion of trained and qualified fire engineers during early design consultation is an effective way of ensuring that a fire strategy has a minimal impact on the design and cost of a project, whilst reducing the chances of programme delays and the need for retrospective changes especially when taking into account the fast-moving pace of the building design and building construction.

Additionally, close and early interaction between fire engineers and authority having jurisdiction (AHJ) is important. Fire engineers should be committed to engaging with the AHJ (fire brigade and/or building control department) regarding the specific challenges associated with the technologies in a data centre building, while incorporating Client's goals and objectives within the fire strategy. At the same time, fire engineers should listen and understand the potential concerns of AHJ and any operational challenges that the local fire brigade have when dealing with these buildings.

FIRE SAFETY DESIGN CHALLENGES

With the high demand, data centre construction is moving forward at pace around the world. Major construction and IT companies are also constantly researching and developing materials and technologies specifically tailored for the data centre industries. While on one side this new market is moving faster than ever, on the other side

updates to building design regulations tend to be a slower process which makes it a challenge to keep pace with this emerging technology and industry evolution. For this reason, several challenges within these facilities are not addressed within regulations. Often building operational requirements challenge the fire life safety recommendations outlined by local regulations. The following outlines some of the key challenges we have encountered while developing the fire safety design for multiple data centres.

HYPERSCALE OF DATA CENTRE

With the remarkable speed of the data world, the tech giants have internally developed an idealised version of their data centre design outlining the main features necessary for the building function. The facility's features are required to be maintained so that workflow is efficient independently of the location of the proposed building. The idealised design does not necessarily account for local regulations or requirements. A fire engineer's scope is generally to adapt the idealised design to the local context/requirements without altering the facility functionality. The fire safety provisions required by national fire safety building standards vary based on the jurisdictions. Therefore, the data centre idealised design is typically updated within the context of the location in which the facility will be constructed while maintaining the workflow efficiency.

For example, data centre layout often presents large volume spaces containing IT equipment. Several local regulations limit the compartment maximum area with fire walls to restrict the spread of fire and smoke. Alternatively, a common solution would be the provision of smoke extraction ventilation to allow for exceeded compartmentation area. However, both of these potential solutions may not be acceptable as it would impact the Client's entire operation altering the efficiency required. Hence, alternative fire safety solutions may be required to achieve and demonstrate an equivalent fire safety level as per the local regulations.

CONSTRUCTION PHASING

Due to the large financial impact that surrounds these facilities and the high demand

for them, the time it takes for a facility to be ready for operation is crucial for the Client. Building construction is often divided into several construction phases to optimise the construction time and facility operation. The design is to be developed so that the first-constructed building section is ready for operation while the remaining facility is under construction. Therefore, each of the phasing construction sections are to be designed in such a way that fire life safety compliance and building efficiency are achieved throughout all the stages of construction (i.e. each facility section alone and entire facility). At the same time, the fire design requirements to support this phasing need to be efficient and cost effective as they are temporary measures to achieve compliance. For example, egress design and its partial handover are to be developed appropriately for the phased handover of a portion of the facility. Occupants may encounter obstacles on the way of egress (potential barrier due to the transient environment of the site work), less stable and not code compliant temporary means of descent (ladder, scaffold stairs) while ensuring that attempts to make a speedy exit do not create an unsafe exit [8].

Uninterruptible Power Supply (UPS) Systems
Uninterruptible power supply (UPS) systems are installed to increase resilience to loss of utility power within data centre facilities until generator power is available. These systems are usually powered by valve-regulated lead-acid (VRLA) batteries and by Lithium-Ion Battery (LIB) technology. The use of LIB technology has been encountered in the majority of the previous experiences. There are many types of LIB and the technology is continually evolving to meet growing demand for enhanced electrochemical and safety performance requirements. The most notable component of the current LIB is the electrolyte, which is a mixture of combustible organic solvents.

Thermal runaway is the major fire risk from LIBs, as mechanical (physical damage), electrical (failure of the battery management system) or thermal (failure of thermal management system) damage can lead to a self-sustaining fire that spreads to adjacent

cells. As per Figure 4, thermal runaway (or Internal Short-Circuit) may also be a result of several other causes in accordance with UL 9540A [9]. This can result in rapid fire development and venting of combustible and toxic gases into the environment. These gases may ignite leading to a fire or accumulate and then potentially become explosive if not properly considered.

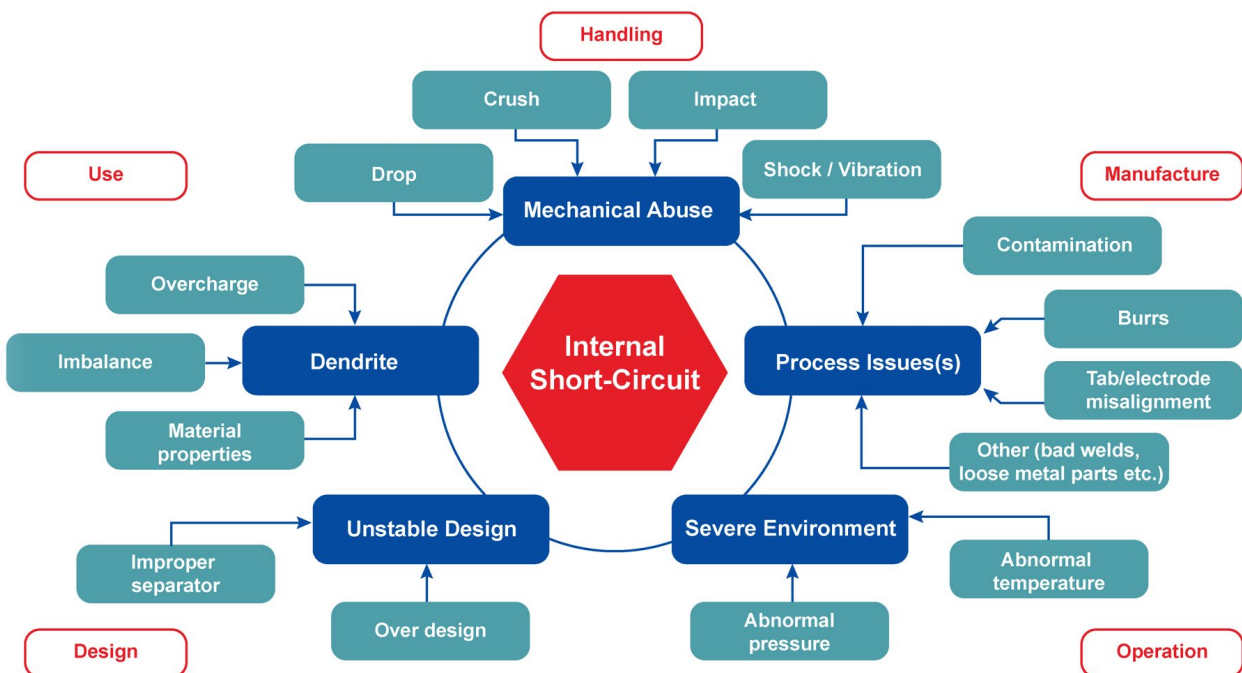
LIB fires are challenging to suppress as reignition can occur if heat is not removed from the affected batteries. Therefore, fire suppression methods must effectively remove the heat from batteries to inhibit the propagation of thermal runaway to adjacent battery cells. Although non-water based suppression system methods can be effective in tackling the initial fire, this is poor at removing heat from the battery system and stopping the thermal runaway process. Therefore, with the use of a non-water based system the initial fire can be extinguished but reignition can occur where thermal runaway process is not interrupted. For this reason, a water-based system is currently the favoured suppression medium as it is effective in cooling and mitigating thermal runaway propagation [10]. However, sprinkler systems have reported poor penetration to cell-level due to the shielding caused by battery casing. Water can also be damaging to the remaining electronics. A sprinkler system will require the installation of drainage systems as well as a detailed study to ensure that any contaminated water, due to the chemical liquid released by the UPS, will be treated according to local regulations. No specific type of sprinkler (e.g. wet, pre-action, water mist, etc.) is defined by international standards. Each of them has its own advantages and disadvantages. Wet sprinkler systems present a risk as water is always present within the pipes. This may cause damage to the IT equipment in case of pipe leakage or accidental discharge. On the other hand, pre action systems have dry pipes (no water within the rooms) and the water discharge will be delayed slightly as the pipes fill on activation, potentially allowing extended fire growth causing additional unwanted property damage.

The implementation of fire safety provisions for LIBs in data centres typically falls within the domain of national building regulations, and operational health and safety regulations. The fire safety provisions required by national building standards typically do not currently account for the distinct fire safety risks posed by LIBs. Therefore, the selection and specification of appropriate fire risk mitigation measures for LIB installations must be assessed within the context of the building in which they are to be installed.

Few international guidance, documents directly addressing this UPS topic have been published. Although UL standards are typically utilised within the Americas, UL LIB testing has been utilised within the EU in lieu of an appropriate or harmonised European testing. UL 9540A [9] evaluates the fire characteristics of a battery energy storage system that undergoes thermal runaway. The data generated from this test can be used to determine the appropriate fire and explosion safety provisions and specifications required for the battery. Additionally, the National Fire Protection Association (NFPA) released NFPA 855 [11] providing guidance for the design,

construction and installation of energy storage systems of different technologies for both internal and external provisions as briefly outlined in Figure 5. NFPA 855 [11] recommends the provision of explosion safety and thermal runaway for most of the UPS technologies. The distribution and quantity of gases released are battery chemistry dependent but in general include flammable and toxic substances. Understanding the chemistry-specific off-gases substances and their properties is a key fire safety consideration.

It is noted that recent UPS systems have been developed to include safety systems to prevent the thermal runaway from taking place. However, the fire safety of UPS systems is an evolving and broad topic. Fire engineers should have a detailed understanding of the physical and chemical UPS system behaviour under fire conditions. The specific fire safety design will vary for each data centre depending on location, performance targets, business continuity risk tolerance.



[9]

Compliance Required	Battery Technology				Sodium Nickel Chloride	Other Electrochemical ESS and Battery Technologies ^b
	Lead-Acid	Nickel ^a	Lithium-Ion	Flow		
Exhaust ventilation	Yes	Yes ^c	No	Yes	No	Yes
Spill control	Yes ^d	Yes ^d	No	Yes	No	Yes
Neutralization	Yes ^d	Yes ^d	No	Yes	No	Yes
Safety caps	Yes	Yes	No	No	No	Yes
Thermal runaway	Yes ^e	Yes	Yes ^f	No	Yes ^f	Yes ^f
Explosion control	Yes ^g	Yes ^g	Yes	No	Yes	Yes
Size and separation	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

[11]

COMPOSITE WALL PANEL CONSTRUCTION

The composite wall panel partitioning system, generally known as whitewall, is considered an economic and efficient way to build partitions that can be laid vertically or horizontally and is suitable for use within temperature controlled and hygiene safe environments, such as data centres. The composite wall panel substrate is generally composed of steel with a choice of coated finishes depending on the application. This can also be used for fire resistance wall partitions.

The composite wall panel partition is widely used within data centre buildings as an alternative partition method. Due to the nature of the facility, partitions are penetrated by a significant number of services (such as cable trays, pipes, ductwork and doors). As the use of composite wall panel in data centres has increased, the composite wall panel technology has developed further to accommodate the requirements (i.e. large number of service penetrations). It is crucial to ensure that the materials, used in the building work, are capable of meeting the relevant fire performance and essential that the materials and products supplied are of the same specification as those tested or assessed. However, the fire testing of this type of partition in conjunction with the various fire stopping systems for openings and penetrations is still in its infancy. This represents a gap for the fire certification of the composite wall panel provision and penetration combinations.

Regulations typically require products to be properly fire tested and certified. In compliance with test standards, extended field of applications are available to extend the application of fire test results for a given product. An alternative method used within the industry is assessments in lieu of tests (traditionally known as Engineering Judgements). These do not achieve prescriptive compliance with test standards or their extended field of application and are based on fire test data for different products in isolation. Assessments should only be carried out by people who are qualified and have experience in product testing but should be used with caution and supported by quantified evaluations. Assessments have been used in the past to address the gap between product testing related to composite wall panel systems but may not be acceptable to all AHJs. Therefore, product suppliers are currently undertaking various testing in this area to comply with the prescriptive test standards and their extended field of application. This lag in fire testing must be understood by fire engineers on data centre projects to avoid any unnecessary certification issues with the project near completion.

ENGINEERED ARCHITECTURE

Contrary to most other building types, data centre buildings are engineered architecture design. As these buildings are basically large service facilities, the engineering disciplines (such as electrical, mechanical and fire safety) regularly drive the design of the building. While architecture will “adapt” and follow the engineering requirements, these engineering

requirements need fire engineer's involvement to ensure sufficient fire safety objectives are achieved.

Data centre buildings consume a large amount of energy for a 24/7 yearly operation. The potential for power cut events poses a serious threat to the operation of the building. Therefore, back-up power systems are provided for each data centre building. This back up power system can be provided via the application of a large number of both transformers and generators. Diesel powered generators are preferred for simple refilling and diesel availability. They are typically located near other transformers and generators and to the main building to provide essential services. The presence of large diesel tanks and electrical equipment in close proximity to the building presents an increased fire risk if the minimum separation distances are not maintained. For these reasons, enhanced and elaborate passive and active fire protection strategies are to be developed to prevent any major life and property damages, taking into account the distances to other facilities and to exit pathways and the numerous service penetrations into the building.

As large numbers of ancillary facilities are provided for the operation of data centre, there are many service penetrations into the main building. If large swathes of the façade are used for cooling purposes, there is little room left for service penetrations from ancillary buildings into the main building. Careful coordination is to be carried out to ensure to maintain the required fire safety strategy with regards to compartmentation, means of egress safety and, external fire spread risks and certified fire stopping solutions.

Data centres contain a large number of servers working constantly, therefore powerful cooling / ventilation systems are constantly in operation to prevent overheating of the servers. Overheating is a serious risk within this type of building and may cause considerable loss of data and finance. Ventilation systems, provided for ordinary air cooling, are designed to run until destruction throughout the buildings life to prevent

overheating even in case of a fire event. As a result of this run-to-destruction strategy, ventilation plenums forming large cavities spanning across large areas of the building to the outside tend to be used. If not carefully considered, this presents a risk of unseen smoke/fire spread across different areas where, in a typical building, fire barriers would be provided to subdivide the space, and the ventilation system would shut down to mitigate this. However, by deploying a tailored compartmentation strategy, fire risk assessment, and alternative sophisticated detection and suppression systems, an enhanced and accurate strategy can be developed to mitigate these risks achieving the required fire safety performance without impacting on the operational needs.

SECURITY VS. EGRESS

Continuous and reliable access to data is the cornerstone of the modern digital economy meaning data centres are now a core part of countries' infrastructure. Resilient and secure systems are fundamental for operators, with costumers expecting secure data services. Robust security provisions are required to have tolerance for malicious threats at any time.

With restricted access and highly secured facilities, the security measures compete with life safety measures for egress. Even if a fire is detected and confirmed within the building, only specific doors providing egress will be released and available for egress. What doors are to open? How to consider the characterization of the occupants? Are these doors adequate to meet the objectives of the fire strategy? Extensive coordination between different teams is crucial to develop significant cause and effect matrix and management policy system is in place. These are required to be developed in a way that an appropriate egress strategy is available for occupants in any potential fire scenarios.

FUTURE TECHNOLOGIES DEVELOPMENT

Giant tech companies now account for a large portion of the world's most valuable companies and the recent pandemic has fuelled this development further as people and businesses turned to technology to face

different challenges associated with the pandemic. Large parts of society are deeply dependent on the digital environment and industry is experiencing a never-seen evolution on both IT technology and engineering design. These evolutions will continue to present additional challenges for the fire safety design of data centre buildings. The following are just a few of the upcoming alternative approaches that are on the horizon for data centre design:

- *Multi-Story Data Centres-* Many data centre buildings are developed outside of major towns with lower real estate costs as they can benefit from the fast communication networks available. However, this is rapidly changing. Several tech giants require low latency for city-workers using applications - requiring these buildings to be located within the city. The result is multi story data centre buildings. Back in 2011, proposals for the development of 1.1 million square feet (~100 thousand square meters) of data centre space was presented for an existing multi-purpose iconic building (Verizon Building) in New York City downtown. However, the proposal was not accepted due to warnings for the life safety risk for the remaining floors and central locations potential issues. Furthermore, Huawei and Keppel Data Centres have currently joined the Info-communications Media Development Authority of Singapore (IMDA) to carry out a feasibility study on a “green” high rise data centre building. The Singapore Government is currently looking to build a 20-storey data centre facility. This evolution will trigger different challenges for fire safety engineering design and several questions regarding this evolution are being raised within the fire safety community. In the case of a multi-purpose high rise building, questions are being raised regarding how to guarantee the safety of the non-data centre building floor plans, how the interaction of these floor plans will occur, and how back- up power diesel generator, transformers and battery systems can be

provided safely within the high rise building.

- *UPS Systems-* Electrochemical energy storage and battery chemistries are continuously advancing fields and are evolving simultaneously. There are several battery technologies that are currently subject to academic research for future potential widespread development. One of the most feasible options is Lithium air batteries. The evolution from the today Lithium-Ion battery is that the oxidation reaction used to release electrons is via the use of atmospheric oxygen. However, there are several critical chemical processes which should be controlled and are under research now [12]. Battery technologies and their level of safety are likely to vary in the future. Fire risk mitigation measures of data centre buildings containing batteries should consider the potential impact of changing battery chemistry. The appropriateness and cost-benefit analysis of the measure may be necessary. These uncertainties trigger several questions, such as: Due to these ever-evolving technologies, is it possible to design a building to contain batteries that have not been developed yet? What if the next technology will present more serious fire and explosive risks? Is the option to update the building services together with the battery feasible?
- *Sustainability-* Although the European Green Deal has 2050 as a target for carbon neutrality, Facebook global operations will aim to achieve net-zero carbon emissions and be 100 per cent supported by renewable energy by 2030 [13]. Everything in our life seems to sit in the cloud but physical buildings are filled with rows of servers and providing air conditioning to maintain ideal temperature. At the moment, data centre buildings have a considerable impact spanning from energy and water consumption to greenhouse gas emissions. In Ireland alone, data centre buildings will be consuming 29% of Ireland’s electricity by 2028 [14]. Among the current technologies used for the achievement of this green

impact, there is the provision of photovoltaics (PV) panels for green energy and limited green Roof area for rainwater management, insulation purpose and air quality improvements.

Most of the tech giants are not only aiming for sustainable data centre buildings but regenerative buildings have become the ultimate goal. A complete zero-carbon economy ensuring that data centres make a positive contribution to the world during this climate change crisis. Several renewable technologies are being used to achieve this goal, such as hydrogen usage, alternative cooling system approach, PV panels and large amounts of green roof/wall. These new technologies will present fire safety challenges for the design of these buildings. How are we going to use hydrogen in a safe way? Alternative cooling system will cause challenges to fire compartmentation strategy? How can we allow multiple large green roof/wall installations in a building and ensure to mitigate the fire/life safety risks?

The abovementioned new technologies are only some of the numerous ones under development within the industry. Although the implementation of these new technologies may solve one set of challenges, these may present new challenges to fire safety. They therefore require a thorough understanding and increasingly innovative design solutions from fire engineers to mitigate risks. This should not only be considered during the design stage of the project, but this should also be considered throughout the life of the building when subjected to renewals. It is the role of the fire engineer to understand, anticipate, and react to these innovations to ensure that an appropriate and proportionate fire safety design is developed.

CONCLUSIONS

During this historic era of “The Internet of Everything” and a potential pandemic era starting, the internet and technology are helping people dealing with the new numerous challenges to be faced. This resulted in an exponential growth of the big tech companies and a high demand for their resources. As a

result of this people and business shift, data centre buildings demand is rising rapidly for the purpose of data storage and website and application function.

Although data centre buildings were present before this internet and pandemic revolution, several building features have been altered due to the big advancement in the building design, technology industry, and workload efficiency. Following the substantial push from the giant tech companies for data centre construction, technology and construction supply, leaders have worked hard for the development of tailored technologies for this construction sector. These new technologies, together with the challenges linked to the data centre buildings design, present new fire safety challenges. These challenges are often exacerbated due to a lag in direction from local guidelines and fire testing certification. In addition, the growth of data centres and industry around them is expected to grow in the near future. Therefore, the development of new buildings and IT technologies will present new challenges for the fire safety design of the building.

Due to these new challenges and lack of international regulations addressing the issue, fire safety engineering assessment, and its assumptions, will be crucial for the design of a fire safety building of today and the future. Also, fire engineers should be committed to engage with the authority having jurisdiction (fire brigade and/or building control department) regarding the data centre building purpose and its challenges linked to the building functionality and technologies, while understanding and incorporating Client’s goals and objectives within the fire strategy. This should result in a deeper understanding of the building behaviour from a holistic engineering point of view while ensuring a more comprehensive approval process between the parties involved (Client, Fire Consultant and AHJ).

This article highlights the main new fire engineering challenges encountered during the design of data centre buildings. While the fire life safety design for this type of building is often perceived as relatively straightforward,

the building functionality requirements challenge several items within the fire safety building design. It is noted that the overview of these challenges is derived from the previous project experience. This is not intended to be an exhaustive list of all the data centre building challenges. Although there is not a straightforward solution for each of the above mentioned items which can be adopted for all data centre projects, it is essential for fire engineers to fully understand the building functionality and design proposed. Fire safety design for data centre building, as per all buildings, cannot be designed by simply checking boxes within the local regulations. In-depth understanding and analysis are critical for the development of a robust and effective fire safety engineering design.

REFERENCES

- [1] H. R. a. E. O.-O. Max Roser, "Our World in Data," 2015. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/internet>.
- [2] B. Marr, "How Much Data Do We Create Every Day? The Mind-Blowing Stats Everyone Should Read," *Forbes*, [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/05/21/how-much-data-do-we-create-every-day-the-mind-blowing-stats-everyone-should-read/?sh=5dc1222560ba>.
- [3] Cisco, "What is a Data Center," Cisco, [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/data-center-virtualization/what-is-a-data-center.html>.
- [4] G. V. R. "Data Center Power Market Size, Share & Trends Analysis Report by Product (PDU, UPS, Busway), By End Use (IT & Telecom, BFSI, Energy, By end Use (IT & Telecom, BFSI, Energy, Healthcare, Retail), By Region, and Segment Forecasts, 2019-2025," 2019..
- [5] T. V. O. I. "Average Cost of a Data Center Outage," *Data Center Frontier*, 2016. [Online]. Available: <https://datacenterfrontier.com/average-cost-of-a-data-center-outage/>.
- [6] B. Elliott, "The importance of fire engineering in a data centre," *TECHERATI*, 23 Feb 2016. [Online]. Available: <https://www.techerati.com/the-stack-archive/data-centre/2016/09/23/the-importance-of-fire-engineering-in-a-data-centre/>.
- [7] A. Harrison, "Data centres and technology," Arup, [Online]. Available: <https://www.arup.com/expertise/industry/science-industry-and-technology/data-centres>.
- [8] L. M. H. S. D. E. R. G. "Fire safety in construction: Site evacuation and self-reported worker behaviour," *Safety Science*, vol. 145, p. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105482>, 2022.
- [9] UL, "UL 9540A 'Standard for Test Method for Evaluating Thermal Runaway,'" 2019.
- [1] DNV.GL, "144K9C7-12 - Maritime Battery Safety 0] Joint Development," 2019.
- [1] NFPA, "NFPA 855 'Standard for the Installation of 1] Stationary Energy Storage Systems'," 2020.
- [1] A. K. e. a. "Review on Li-air batteries - 2] Opportunities, limitations and perspective," *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 886-893, 2011.
- [1] Facebook, "Facebook's Net Zero Commitment," 3] Facebook Sustainability, 2020.
- [1] M. Boran, "The true carbon cost of feeding the 4] data centre monster," *The Irish Times*, 2020. [Online]. Available: <https://www.irishtimes.com/business/technology/the-true-carbon-cost-of-feeding-the-data-centre-monster-1.4236923>.

- 6 Rischio incendio delle batterie al litio e prospettive e contributi dal mondo della ricerca
Fire risk for lithium-ion batteries and contributions and perspectives from the research community

RISCHIO INCENDIO DELLE BATTERIE AL LITIO E PROSPETTIVE E CONTRIBUTI DAL MONDO DELLA RICERCA

AUTORE: Francesco Restuccia, Lecturer in Engineering- King's College London, UK

BIO

Dr Francesco Restuccia è docente (Lecturer/ Assistant Professor) presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università King's College London, dove dirige il gruppo di ricerca di ingegneria termica. Francesco è membro del comitato editoriale del Fire Safety Journal. La sua ricerca multidisciplinare nelle scienze termiche si concentra su bioenergia, combustione, dinamiche d'incendio, e scambi termici. Per le batterie al litio, la sua ricerca si concentra sulla prevenzione incendi e ottimizzazione della performance termica.

ABSTRACT

Con l'avvento delle batterie al litio e il loro uso universale negli ultimi decenni, gli incendi che coinvolgono batterie al litio sono sempre più comuni. Questo articolo riassume alcuni risultati recenti sull'innesco di incendi nelle batterie al litio, concentrandosi sull'effetto dell'abuso meccanico, termico, e l'innesco dall'auto-riscaldamento delle batterie. L'articolo presenta alcune delle conseguenze e lacune nei metodi di rilevamento di questo tipo di incendi. Infine, alcuni temi di ricerca ancora aperti e di grande rilevanza per la prevenzione incendi e l'utilizzo più sicuro delle batterie.

INTRODUZIONE

Negli ultimi tre decenni, dopo l'invenzione della batteria al litio (LIB), l'utilizzo di queste batterie è cresciuto esponenzialmente sia per l'elettronica di consumo che più recentemente per veicoli ibridi o elettrici e per l'accumulo d'energia in siti industriali e domestici. Le batterie di questo tipo portano grossi vantaggi dal

punto di vista dell'alta densità di potenza e lunga vita in termini di cicli, ma sono caratterizzate da un rischio per la sicurezza: difatti, nonostante siano statisticamente rari, incendi di batterie LIB succedono sempre più spesso con la crescita del loro uso in sempre più sistemi, con la ricerca di sistemi di ricarica sempre più veloci e con batterie sempre più dense energeticamente. I rischi che derivano da incendi di LIB sono diversi da molti altri tipi di incendi, particolarmente in innesco, durata, tossicità, metodo di propagazione, e estinzione [1] [2]. Esistono varie soluzioni tecnologiche per aumentare i livelli di sicurezza di LIB, che possono essere riassunte nelle categorie di prevenzione, compartimentazione, rilevamento e soppressione [1] [2]. Molto lavoro è stato svolto negli ultimi anni in ognuna di queste categorie, ma quest'articolo si concentrerà principalmente sull'innesco di questo tipo d'incendi, e il loro rilevamento poiché sono due delle aree in cui negli ultimi anni ci sono stati grossi avanzamenti.

ABUSO DI BATTERIE

Negli ultimi anni molti esperimenti sono stati condotti per studiare gli effetti di abusi termici, elettrici e meccanici sulle batterie al litio, e per cercare di comprendere meglio in quali condizioni le batterie diventano un rischio. Esistono vari standard, specialmente nell'Unione Europea, per questo tipo di test e comprendono SAE J2464, UL2580, IEC 62133-2, IEC 62281, SAND 2005-3123, SAND 2014-17053, IEC 62660-3, UL 1973, e altri simili [1].

Nonostante il lavoro nell'armonizzare i vari metodi, gli standard attuali permettono setup molto diversi uno dall'altro e metodi d'innesco diversi fra loro. Attualmente, non esiste un metodo affidabile e ripetibile che porti le celle in fuga termica e che rappresenti realmente i modi di guasto visti sul campo.

Nella Figura 1, si può notare che anche moduli di dimensioni piccole, composti da

solo 8 batterie al litio, per esempio, possono creare fiamme di lunghezza molto superiore al modulo.

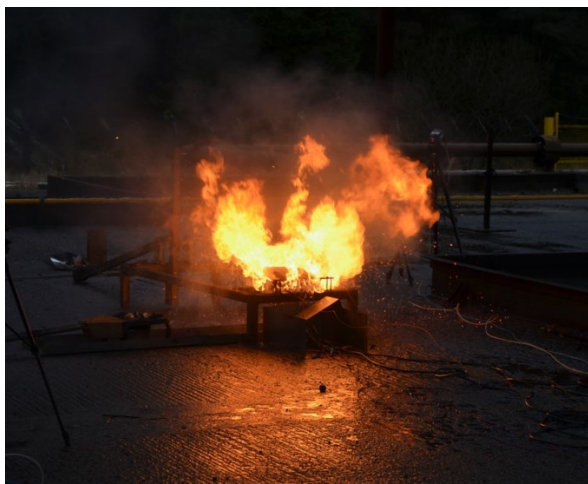


Figura 1. Propagazione di un incendio in un modulo composto da 8 batterie al litio (lithium nickel manganese cobalt pouch cells) in un esperimento di abuso termico nel 2019. Foto scattata dall'autore.

In alcuni esperimenti di abuso termico e meccanico condotti nel 2019 in collaborazione con l'università di Newcastle, si sono rilevate fiamme fino ad una lunghezza massima di 2.75 metri, cioè 9 volte la lunghezza del modulo stesso [2]. Questo comporta una variabile in più da considerare nello sviluppo dei protocolli di sicurezza nell'uso di queste batterie: difatti, se un materiale infiammabile si trova a meno di 275 cm di distanza dal modulo di batterie, potrebbe ricevere una fonte di calore intensa e rapida nel caso di un guasto del modulo.

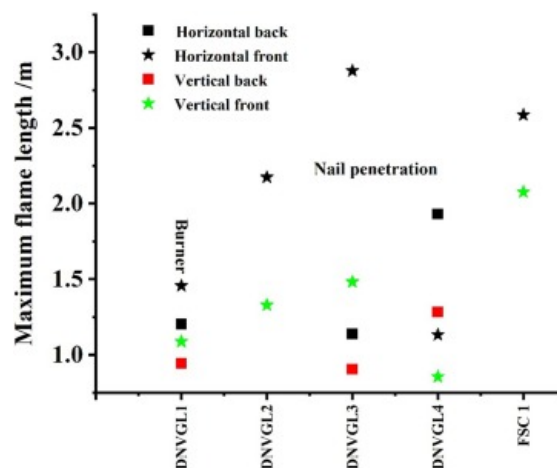


Figura 2. La lunghezza massima misurata delle fiamme in un modulo durante abuso termico e meccanico. Alcune fiamme arrivavano a 2.75 metri di lunghezza e di distanza dal modulo, 9 volte la lunghezza del modulo stesso. Riprodotto con permesso da [2].

Un risultato molto interessante da un esperimento di abuso meccanico del modulo sopracitato riguarda il rilevamento della fuga termica. Molti sistemi di rilevamento di problemi in un modulo di batterie, quando presenti, si basano sulla lettura di anomalie nel voltaggio della cella o di una parte del modulo. Nel caso di questo esperimento, nonostante un cortocircuito meccanico creato con la penetrazione di una vite in tutte le celle, come si può vedere nella Figura 3, le cellule inferiori mantengono il loro voltaggio (V1, in rosso) per circa 2 minuti dopo l'inizio della propagazione termica, quando la temperatura è oramai già oltre i 400°C e le fiamme sono visibili dall'esterno del modulo [2]. Questo esperimento è il primo nella letteratura in cui è chiaramente collegato il mantenimento di voltaggio dall'iniziazione della propagazione termica all'evaporazione dell'elettrolita, ma questo fenomeno è stato rilevato anche in passato in [3] e teorizzato da [4] dove si evidenzia che probabilmente la motivazione è corto-circuito allo stato solido dopo l'eliminazione dell'elettrolita. Questo risultato ha importanti implicazioni per i sistemi di gestione elettrici di batterie, poiché questi sistemi utilizzano il voltaggio di alcune celle (in genere da parti diverse

di un grande sistema di batterie) per monitorare lo stato di salute del modulo. Se questo sistema rileva un corto circuito con oltre 2 minuti di ritardo, quando la propagazione termica è ormai esponenziale, la sicurezza del sistema è seriamente compromessa. Dai risultati, si può anche notare nella Figura 3 che la temperatura rilevata dalla superficie superiore del modulo (in blu) rileva un aumento di temperatura quasi 2 minuti prima della termocoppia localizzata sulla superficie inferiore del modulo. Questo è dovuto al fatto che le fiamme iniziano a propagarsi dalla parte superiore del modulo, ma in altri esperimenti le fiamme iniziano a propagarsi dal lato. Quindi, non è un rilevamento universalmente applicabile e la temperatura deve essere monitorata in più punti del modulo.

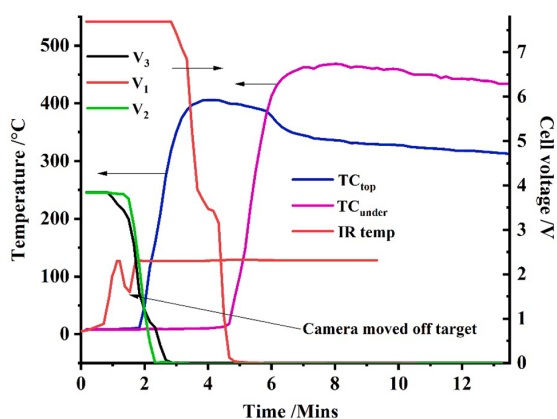


Figura 3. Temperatura nella parte superiore del modulo (blu) confrontata con il voltaggio delle batterie nella parte superiore del modulo (verde e nero) che scende a zero subito dopo il corto circuito, mentre il voltaggio delle celle inferiori (rosso) mantengono il voltaggio per oltre 2 minuti dopo l'abuso meccanico e il corto circuito. Riprodotto con permesso da [2].

L'ultimo risultato che viene analizzato in questa sezione riguarda cosa accade nei casi in cui il guasto di un modulo non comporta un incendio, ma comunque un rischio, e cioè cosa succede quando un guasto comporta la fuoriuscita di gas infiammabile e nocivo senza però portare ad un innesco di fiamma. Nella Figura 4, un modulo di batterie al litio cariche al

50% viene perforato da una vite, creando un corto circuito. Nei primi 30 secondi una nuvola bianca e più pesante dell'aria comincia a crearsi e dopo una quarantina di secondi il flusso d'aria dall'esterno del container inizia a portare i gas verso l'esterno. La nube prodotta è composta da HF, CO₂, CO, H₂, HCl, NO₂, gocce di solvente organico, e alcani e alcheni vari. In tutti gli esperimenti con stato di carica (SOC) maggiore del 50%, questa nube si è sempre incendiata in meno di un minuto. Negli esperimenti con SOC meno del 50%, l'innesco dell'incendio dipendeva da altri fattori, tipo la quantità di ossigeno presente. La conclusione tratta dagli esperimenti è che in uno spazio confinato, il rischio di un incendio con sovrappressione diventa molto più alto, specialmente con batterie a bassa carica. Inoltre, la tossicità di questi vapori bianchi è elevatissima, con conseguente rischio per la salute per il personale antincendio. L'ultimo punto sulla tossicità è che in presenza di sistemi di soppressione che generano nuvole bianche, esiste un rischio che alcuni di questi gas nocivi e altamente infiammabili vengano scambiati per gas derivati dal sistema di soppressione.



Figura 4. Abuso meccanico di un modulo di batterie al litio cariche al 50% State of Charge (SOC). La nube di gas prodotta conteneva HF, CO₂, CO, H₂, e HCN [2]. Riprodotto con permesso da [2].

Per ragioni di spazio, questo articolo non entra nel dettaglio sugli effetti dello stato di carica delle batterie a parte l'effetto sulla generazione di nubi di gas nocivi. Lo stato di carica è tuttavia uno dei parametri più importanti per la propagazione di incendi in batterie e più informazioni sul suo effetto si trovano in articoli come [5] [6] [7] [8] [9], dove l'effetto sulla tossicità dei gas e propagazione di incendi vengono esplorati in dettaglio.

INNESCO DA AUTO-RISCALDAMENTO

Le batterie al litio passano una gran parte della loro vita in modalità passiva, cioè durante il trasporto e lo stoccaggio delle batterie stesse. La sezione precedente si è concentrata su cause esterne di incendi, cioè abusi. Questa sezione invece analizza cause interne di innesco di incendi di batterie, cioè l'autoaccensione, anche quando la batteria è in circuito aperto. L'autoaccensione accade a causa di reazioni esotermiche spontanee che causano un aumento di temperatura interna con crescita esponenziale di reazioni chimiche e infine innesco di incendio. Questo fenomeno per le batterie al litio è stato studiato in vari modi sia sperimentali che numerici negli ultimi anni, concentrandosi sull'effetto dello stato di carica, l'effetto dell'aumento di numero di batterie, l'effetto dei diversi imballaggi, e l'effetto di composizioni chimiche diverse [3] [10] [11] [12] [13].

In tutti i casi, la batteria che raggiunge l'autoaccensione a causa di reazioni esotermiche spontanee passa da 3 fasi, come dimostrato in Figura 5. La prima fase è il raggiungimento della temperatura ambiente, la seconda fase il riscaldamento interno a causa delle reazioni interne, la terza fase la fuga termica e innesco dell'incendio. Quello che contraddistingue questo tipo di causa di incendio è che c'è una relazione diretta e inversamente proporzionale fra numero di batterie e temperatura ambiente necessaria per l'autoaccensione. Più batterie si hanno in un sistema di stoccaggio, sempre a

circuito aperto, quindi non collegate fra loro o in uso, e minore è la temperatura necessaria per l'innesco dell'incendio. Difatti, in [10] viene dimostrato che in condizioni in cui milioni di batterie sono stoccate insieme, per esempio in un container marino su una nave da trasporto, la temperatura ambiente di 40°C causerebbe un incendio per autoaccensione se le batterie hanno una carica dell'80%.

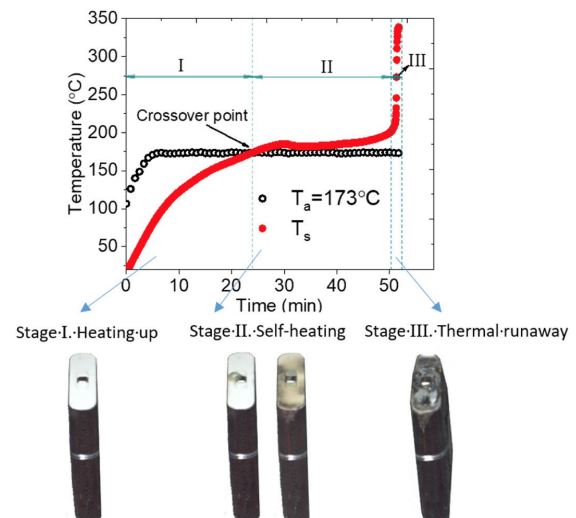


Figura 5. Le varie fasi in cui una batteria raggiunge l'autoaccensione: 1) fase di riscaldamento; 2) Fase di generazione di calore interno; 3) fuga termica. Riprodotto con permesso da [3], sotto Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Naturalmente, ci sono molti parametri che hanno effetto sulle caratteristiche di innesco di un incendio di batterie. Analizzando i parametri chimici, fisici e le condizioni al contorno tipo emissività e coefficiente di scambio termico, come si può vedere in Figura 6, di gran lunga il parametro che ha più importanza è l'energia di attivazione della batteria, quindi un parametro chimico [10].

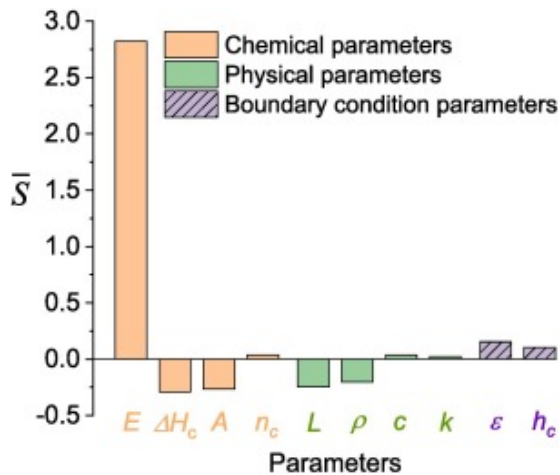


Figura 6. Studio di sensitività di parametri chimici fisici e condizioni al contorno sull'autoaccensione di una batteria al litio. Riprodotto con permesso da [10].

Lo stato di carica della batteria ha un grosso effetto sulla propensione all'autoaccensione. Difatti, come si può vedere nella Figura 7, una pila di batterie di quattro metri arriverebbe a condizioni per l'innesco di un incendio con una temperatura ambiente di 40°C, se carica all'80%, ma di ben 80°C se carica solo al 30%.

Inoltre, l'effetto dell'autoaccensione sulla batteria varia, in base allo stato di carica. Ad esempio, per una singola batteria di tipo LiCoO₂, come si può vedere anche graficamente in Figura 8, uno stato di carica maggiore comporta danni fisici maggiori alla batteria nel momento in cui raggiunge l'autoaccensione. Dallo stato di carica dall'80% in su, la batteria è completamente distrutta dopo la fuga termica. Questo è dovuto dalla maggiore energia presente nella batteria.

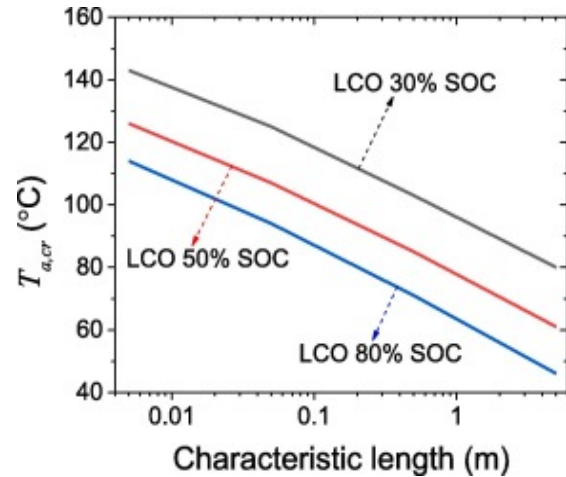


Figura 7 Temperatura ambiente necessaria per l'innesco di un incendio da autoaccensione, rispetto alla lunghezza caratteristica del sistema, in base allo stato di carica delle batterie. Riprodotto con permesso da [10].

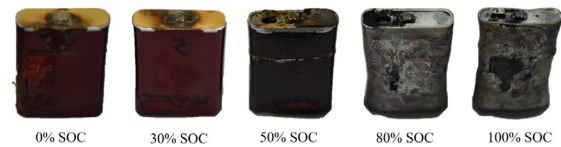


Figura 8. Effetto dello stato di carica sulla batteria nel momento in cui la batteria raggiunge la fuga termica per autoaccensione. Riprodotto con permesso da [3], sotto Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Il materiale con cui è formato il catodo della batteria al litio ha anche un grosso effetto sulla propensione all'autoaccensione: per esempio, come si può vedere in Figura 9, dove per due materiali diversi di catodo, LiCoO₂ (LCO) e Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O₂ (NCM) il catodo NCM è molto meno reattivo e quindi meno propenso all'autoaccensione.

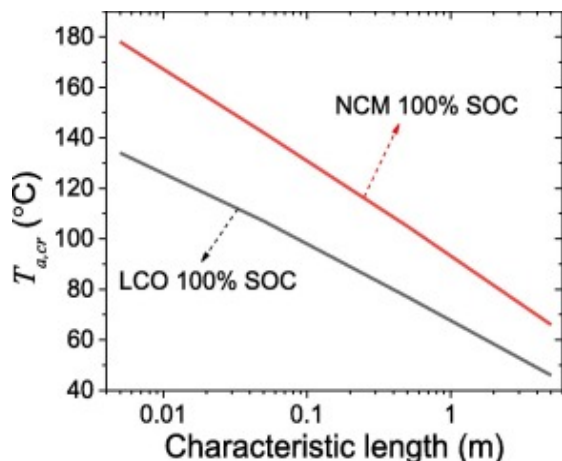


Figura 9. Temperatura ambiente necessaria per l'innesco di un incendio da autoaccensione, con stato di carica al 100%, per due materiali diversi di catodo: LiCoO_2 (LCO) e $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ (NCM). Riprodotto con permesso da [10].

Infine, gli ultimi due effetti da considerare per l'autoaccensione sono come la cinetica cambia in base all'aumento di dimensione del sistema e a modifiche della configurazione di stoccaggio o isolamento. Come mostrato graficamente in Figura 10, un pacco tipico di celle può contenere circa 80 celle, uno scaffale industriale circa 24mila celle, e un'area di un magazzino quasi 2 milioni di celle. In [11], utilizzando un modello multi-step termochimico, viene dimostrato che lo scambio termico nei quattro scenari diversi cambia molto il comportamento verso l'autoaccensione del sistema. Difatti, il modello prevede che la temperatura di autoaccensione diminuisce radicalmente (da 155°C a 85°C) andando da una singola batteria ad un rack di batterie. Inoltre, il modello dimostra che il meccanismo che domina l'autoaccensione passa dalle reazioni che avvengono dall'elettrodo positivo per gli ensemble piccoli, alle reazioni che avvengono dall'elettrodo negativo per i sistemi più grandi. Questo significa che i parametri chimici di importanza cambiano in base alle dimensioni del sistema considerato.

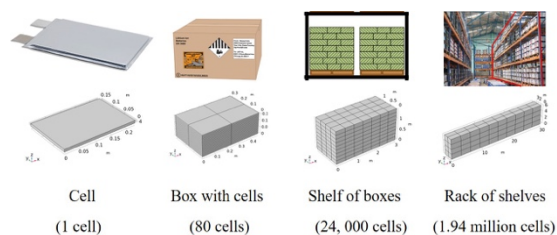


Figura 10. Quattro scenari tipici di stoccaggio di batterie, considerate per studiare l'effetto delle dimensioni di un ensemble sul tipo di reazioni interne alla batteria. Riprodotto con permesso da [13].

Il distanziamento delle batterie in un pacco ha anche un effetto, non lineare. Come si può vedere in Figure 11 e 12, la configurazione teorica in cui un pacco è pieno completamente di batterie senza spazi induce ad una maggiore dissipazione di calore, e quindi sarebbe più sicura di una configurazione con molto spazio fra le batterie, dove l'aria manterrebbe molto calore. Se invece dell'aria, fra le batterie lo spazio venisse sostituito da un materiale isolante con una conduttività molto bassa, risulterebbe in un sistema ancora più propenso all'autoaccensione. Quindi la configurazione delle scatole ed il materiale utilizzato diventano parametri importanti da considerare.

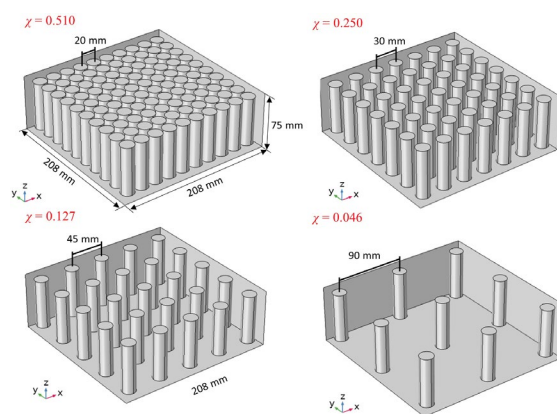


Figura 11 Configurazioni diverse di batterie, con frazione di volume basata sulla percentuale di batterie presenti rispetto allo spazio vuoto. Riprodotto con permesso da [11].

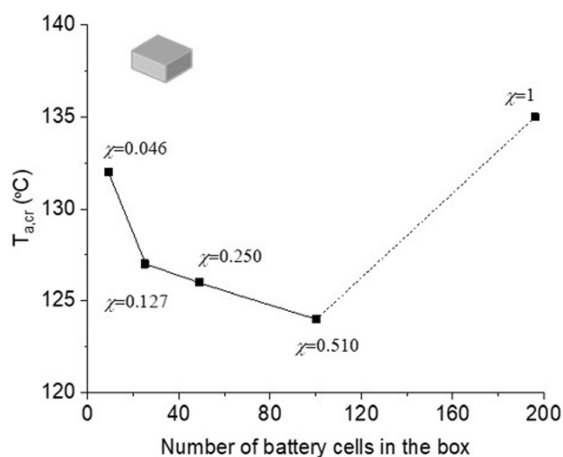


Figura 12 L'effetto della riduzione di spazio fra batterie, e configurazioni diverse di packing (basato su Figura 11). Riprodotto con permesso da [12], sotto Creative Commons Attribution 4.0 International License.

PROSPETTIVE SUL FUTURO

La ricerca e l'industria delle batterie al litio lavorano da anni sullo sviluppo di batterie più sicure. Un recente studio sui bisogni industriali e di ricerca ha evidenziato i molti limiti attuali e approcci futuri necessari [1]. Di conseguenza, la parte finale di quest'articolo si concentra sul riassumere alcune aree in cui l'autore crede che ci sia bisogno di uno sforzo da parte di tutte le parti interessate (industria, ricerca, enti di prevenzione, e enti di standardizzazione), nelle cinque categorie con soluzioni tecnologiche per aumentare i livelli di sicurezza di LIB citate nell'introduzione.

1. Per la compartimentazione degli incendi di batterie, è necessario creare più barriere termiche, per evitare che l'incendio di una singola batteria causi il guasto dell'intero sistema [13]. Questo obiettivo può essere raggiunto tramite l'invenzione di nuove chimiche o materiali che non risultino in fuga termica della batteria con l'aumento della temperatura o corto circuiti oppure via sistemi di controllo attivi che arrestino la fuga termica prima dello sviluppo di incendi.

2. Come menzionato all'inizio di questo articolo, non esiste un metodo di prova standard e ripetibile che copra tutti i vari

metodi di abuso o guasto di una batteria. Persino a riguardo del miglior metodo per indurre la fuga termica di una batteria, non c'è un unico sistema su cui i vari standard si trovino d'accordo [1]. Per esempio, il test dell'autoaccensione non considera nemmeno gli effetti di scambio termico, ma solo chimici. Di conseguenza, in generale, esiste il bisogno urgente di armonizzare gli standard, con più ricerca sul metodo con cui si sviluppano i corti circuiti dentro la batteria stessa, per poter poi sviluppare un metodo per riprodurlo in maniera stabile. Solo così riusciremo a includere informazioni come lo stato di carica, lo stato di salute, che corrisponde agli effetti dell'invecchiamento di una batteria, e infine le dimensioni di un sistema pienamente nello studio di innesco e propagazione di incendi nel test o standard necessario per approvare la sicurezza di un sistema di batterie.

3. Per la prevenzione di questi incendi di batterie, è necessario sviluppare dei metodi per la progettazione prestazionale, come già esistono e vengono usati in altri campi della prevenzione incendi.

4. Molto lavoro deve essere ancora svolto nell'area della soppressione di questo tipo di incendi. Attualmente il metodo di soppressione di incendi di LIB varia da paese a paese e ogni metodo attuale comporta grossi svantaggi. Per questioni di spazio, non sono analizzati in questo articolo ma molti possono essere trovati nelle referenze [5] e [1].

5. Infine, l'area in cui si sta avendo un ottimo avanzamento è quello dell'immediato rilevamento di guasti e/o incendi. Questo articolo si è concentrato principalmente su alcuni dei limiti nell'usare il voltaggio come strumento di rilevamento, ma una combinazione di voltaggio, corrente e misure di temperatura possono ad esempio essere implementate nel sistema di gestione delle batterie (Battery Management System, BMS). Grandi sviluppi in quest'area sia in industria che nel mondo della ricerca

stanno portando allo sviluppo di sensori al di fuori del solo BMS per poter sviluppare un sistema effettivo di allerta precoce.

Molto lavoro è stato svolto evidenziando il bisogno di batterie più sicure andando avanti, ma altrettanto lavoro deve essere svolto per assicurarsi che l'onnipresente diffusione di batterie al litio sia sicura e scalabile.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Bravo Diaz, X. He, Z. Hu, F. Restuccia, M. Marinescu, J. Barreras, Y. Patel, G. Offer e G. Rein, «Meta-review of fire safety of Lithium-ion batteries: industry challenges and research contributions,» *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 167, n. 9, 2020.
- [2] P. Christensen, Z. Milojevic, M. S. Wise, M. Ahmeid, P. S. Attidekou, W. Mrozik, N. A. Dickmann, F. Restuccia, S. M. Lambert e P. K. Das, «Thermal and mechanical abuse of electric vehicle pouch cell modules,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 189, p. 116623, 2021.
- [3] X. He, F. Restuccia, Y. Zhang, Z. Hu, X. Huang, J. Fang e G. Rein, «Experimental Study of Self-heating Ignition of Lithium-Ion Batteries During Storage: Effect of the Number of Cells,» *Fire Technology*, vol. 56, pp. 2649-2669, 2020.
- [4] X. Feng, S. Zheng, D. Ren, X. He, L. Wang, H. Cui, X. Liu, C. Jin, F. Zhang, C. Xu, H. Hsu, S. Gao, T. Chen, Y. Li, T. Wang, H. Wang, M. Li e M. Oyuang, «Investigating the thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries based on thermal analysis database,» *Applied Energy*, vol. 246, pp. 53-64, 2019.
- [5] Q. Wang, B. Mao, S. Stolarov e J. Sun, «A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 73, pp. 95-131, 2019.
- [6] P. Ribiere, S. Grugeon, M. Morcrette, S. Boyanov, S. Laruelle e G. Marlair, «Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry,» *Energy & Environmental Science*, vol. 5, pp. 5271-5280, 2012.
- [7] J. Sun, J. Li, T. Zhou, K. Yang, S. Wei, N. Tang, N. Dang, H. Li, X. Qiu e L. Chen, «Toxicity, a serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion battery,» *Nano Energy*, vol. 27, pp. 313-319, 2016.
- [8] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu e X. Huang, «A review of Battery Fires in Electric Vehicles,» *Fire Technology*, vol. 56, pp. 1361-1410, 2020.
- [9] A. Baird, E. Archibald, K. Marr e O. Ezekoye, «Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas,» *Journal of Power Sources*, vol. 446, p. 227257, 2020.
- [10] X. He, Z. Hu, F. Restuccia, H. Yuan e G. Rein, «Self-heating ignition of large ensembles of Lithium-ion batteries during storage with different states of charge and cathodes,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 197, p. 117349, 2021.
- [11] Z. Hu, X. He, F. Restuccia, H. Yuan e G. Rein, «Numerical study of scale effects on self-heating ignition of lithium-ion batteries stored in boxes, shelves and racks,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 190, p. 116780, 2021.
- [12] Z. Hu, X. He, F. Restuccia e G. Rein, «Anisotropic and homogeneous model of heat transfer for self-heating ignition of large ensembles of lithium-ion batteries during storage,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 197, p. 117301, 2021.
- [13] Z. Hu, X. He, F. Restuccia e G. Rein, «Numerical Study of Self-Heating Ignition of a Box of Lithium-Ion Batteries During Storage,» *Fire Technology*, vol. 56, pp. 2603-2621, 2020.

FIRE RISK FOR LITHIUM-ION BATTERIES AND CONTRIBUTIONS AND PERSPECTIVES FROM THE RESEARCH COMMUNITY

AUTHOR: Francesco Restuccia, Lecturer in Engineering- King's College London, UK

BIO

Dr Francesco Restuccia is a Lecturer (Assistant Professor) in the Department of Engineering at King's College London, where he leads the thermal engineering research group. Francesco is a member of the editorial board of Fire Safety Journal. His multidisciplinary research in thermal science focuses on bioenergy, combustion, fire dynamics, and heat transfer. His research on lithium-ion batteries focuses on fire prevention and optimization of thermal performance

ABSTRACT

With the advent of the lithium-ion battery, and its universal use in the last decades, fires involving lithium-ion batteries have become more and more common. This article summarises some of the recent results on the ignition of these fires, concentrating on thermal abuse, mechanical abuse, and self-heating ignition of the batteries. This article presents some of the consequences, some of the gaps, especially in terms of detection of such fires, and finally some research areas and questions still unanswered and of great relevance to the prevention of fires and safer use of these batteries.

INTRODUCTION

In the last three decades, after the invention of the lithium-ion battery (LIB), the use of such batteries grew exponentially both for consumer electronics and more recently for hybrid and electric vehicles and for energy storage both domestically and in industry. This type of battery brings huge advantages from the point of view of high energy and power density and in terms of a long life cycle, but it brings with it a safety

risk: in fact, even though they are statistically rare, LIB battery fires happen more and more often with the increased use of these systems, with the search for faster charging systems, and with denser and denser batteries in terms of energy. The risks that derive from LIB fires are different from many other types of fires, particularly in terms of ignition, duration, toxicity, propagation modes, and extinction [1] [2]. There are various technological solutions to increase the level of safety of LIB, which can be summarised in the categories of prevention, compartmentation, detection, and suppression [1] [2]. There has been extensive work in the last few years on each of these categories, but this article will focus primarily on ignition of these fires and their detection, as they are two areas which have had big advancements in the last couple of years.

BATTERY ABUSE

In the last several years many experiments have been carried out to study the effect of thermal, electrical, and mechanical abuse on lithium-ion batteries, to try and better understand under which conditions the batteries become a hazard. There are various standards, especially in the European Union, for this type of tests, which include SAE J2464, UL2580, IEC 62133-2, IEC 62281, SAND 2005-3123, SAND 2014-17053, IEC 62660-3, UL 1973, and other similar tests [1].

Even with harmonization work around the different methods, the current standards still allow setups that can be very different from one to the other, and ignition methods that also vary in between the setups. Currently, there is no dependable and repeatable method to bring the battery cells to thermal runaway that represents the real failure modes seen in the field.

In Figure 1, one can see that even with smaller sized modules, made up of only 8 LIB for example, can still create flames whose length are much greater than the battery module.



Figure 1. Fire propagation in a module made up of 8 (lithium nickel manganese cobalt pouch cells) in a thermal abuse experiment in 2019. Picture taken by the author.

In some of the thermal and mechanical abuse experiments carried out in 2019 in collaboration with the University of Newcastle, flames up to 2.75 metre in length were measured, so 9 times the length of the module itself [2]. This brings in an extra variable to consider when developing safety protocols for the use of these batteries: in fact, if a flammable material is less than 275cm away from a module of batteries, it could be subject to an intense and rapid heat source in the event of a failure of the module.

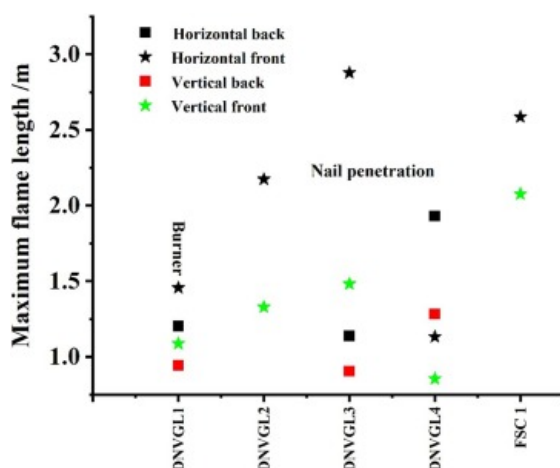


Figure 2. The maximum flame length measured in a module during thermal and mechanical abuse. Some of the flames reached 2.75 metre lengths away from the module, 9 times the length of the module itself. Reproduced with permission from [2].

An interesting result from a mechanical abuse experiment of the module mentioned above is on the detection of thermal runaway. Many detection methods of failures in a module of batteries, when present, are based on the reading of anomalies in the voltage of a cell, or of a part of a module. In the case of this experiment, despite a short-circuit created mechanically with a nail penetration through all of the cells, as can be seen in Figure 4, the lower cells keep their voltage (V1, in red) for about 2 minutes after the start of the thermal propagation, when the temperature is well over 400°C and flames are visible externally to the module [2]. This experiment is the first in the literature where there is a clear link between the maintaining of voltage after the start of the thermal propagation and the evaporation of the electrolyte, but this phenomenon has been seen in the past [3] and theoretically predicted in [4] where it's stipulated that most likely the cause is the solid state short-circuit after the evaporation of the electrolyte. This result has important implications for the electrical management systems of batteries, because these systems use voltage of some of the cells (usually from different parts in a large system of batteries) to monitor the state of health of the module. If this system detects a short circuit with over 2 minutes of delay, when thermal propagation is already exponentially growing, the safety of the system is seriously compromised. From the results one can also notice in Figure 3 that the temperature measured on the surface of the module (in blue) sees an increase of temperature almost two minutes before that of the thermocouple located on the bottom surface of the module. This is because the flames begin to propagate on the upper part of the module, but in other experiments the flames begin propagating from the sides. This means that it's not a universally applicable detection method, and the temperature needs to be monitored in multiple points of the module.

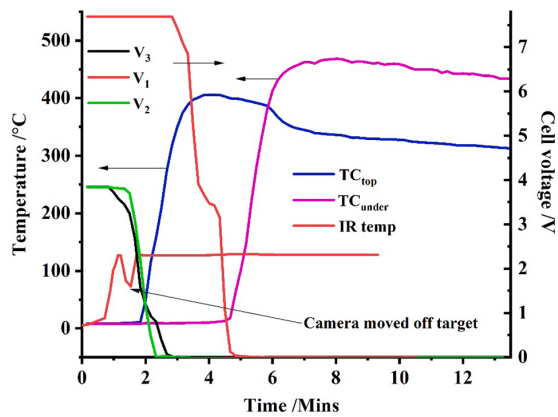


Figure 3. The temperature in the upper part of the module (blue) compared to the voltage of the battery in the upper part of the module (green and black) which decreases to zero right after the short circuit, while the voltage of the lower cells (red) keep the voltage for over two minutes after the mechanical abuse and short circuit. Reproduced with permission from [2].

The last result analysed in this section is what happens in the cases where a fault in a module does not lead to a fire, but still a hazard, so what happens when a fault leads to venting of flammable and harmful gases without the ignition of a flame. In Figure 4, a module of lithium-ion batteries with a 50% state of charge is pierced with a nail, creating a short circuit. In the first 30 seconds a heavier than air white cloud starts to form, and after another 40 seconds the flux of air from the outside of the container starts to take the gas outside the container. The cloud is formed by HF, CO₂, CO, H₂, HCl, NO₂, organic solvent drops and various alkanes and alkenes. In all the experiments where the state of charge (SOC) was above 50% this cloud always ignited in less than one minute. In experiments where the SOC was less than 50%, the start of a fire depended on other factors such as amount of oxygen present. The conclusion from these experiments is that in an enclosed space the risk of a fire with overpressure becomes much higher, especially with batteries at low SOC.

Furthermore, the toxicity of these white vapours is very high, with consequent risk to the first responder's health. The last on the toxicity is that in the presence of suppression systems that generate white

clouds or vapours there is a risk that some of these noxious and highly flammable gases could be confused for gases deriving from the suppression system.



Figure 4. Mechanical abuse of a lithium-ion battery module at 50% state of charge (SOC). The gas cloud produced contained HF, CO₂, CO, H₂, e HCN [2]. Reproduced with permission from [2].

For reasons of length, this article does not go into detail on the State of Charge of the batteries apart from the generation of toxic clouds. State of Charge is one of the most important parameters when studying the propagation of fires in batteries, and more information on its effect can be found in articles such as [5] [6] [7] [8] [9] where the effect on the toxicity of the gases and the propagation of fires is explored in detail.

SELF-HEATING IGNITION

Lithium-ion batteries spend a large part of their lives in passive mode, such as during transport and storage of the batteries. The previous section focused on the external causes of fires, so abuse. This section investigates internal causes of battery fires, so self-heating when the battery is in open circuit. Self-heating occurs because of exothermic spontaneous reactions, which cause an increase of internal temperature, with exponential growth of chemical

reactions until eventual ignition of a fire. This phenomenon has been studied in various experimental and numerical ways for lithium-ion batteries, concentrating on the effect of state of charge, effect of number of batteries, effects of different packaging, and effect of different kinetics [3] [10] [11] [12] [13].

In all the cases, the battery that reaches self-heating ignition because of exothermic reactions goes through three stages, as shown in Figure 5. The first stage is the heating-up to the environmental temperature, the second stage is the self-heating stage because of the internal reactions, and the third stage is that of thermal runaway and ignition. What distinguishes this type of fire ignition from other ignition modes is that there is a direct and inversely proportional relationship between the number of batteries and the environmental temperature needed for self-heating ignition. More batteries one has in a storage system, still in open circuit, so not connected between each other or in use, and smaller is the temperature needed for ignition. In fact, in [10] it is shown that in the condition where millions of batteries are stocked together, for example in a transport ship container, the ambient temperature of 40°C would cause a fire by self-heating ignition for batteries with 80% state of charge.

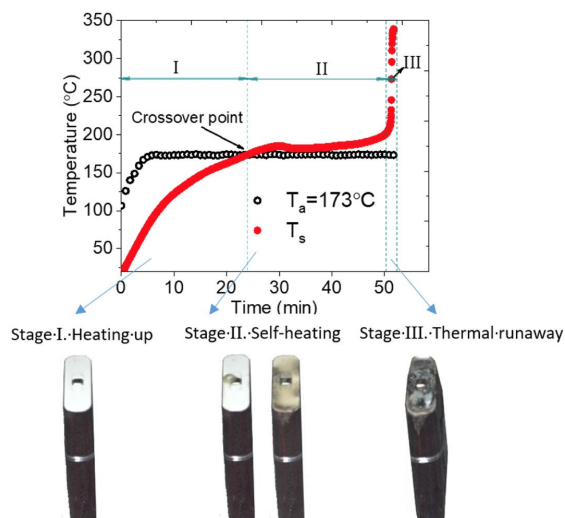


Figure 5. The various stages in which a battery reaches self-heating ignition: 1) heating up

stage; 2) self-heating stage; 3) thermal runaway, Reproduced with permission from [3], under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Naturally there are many parameters which effect the ignition characteristics of a battery fire. Analysing the chemical and physical parameters, and the boundary condition parameters such as emissivity and heat transfer coefficient, as can be seen in Figure 6 the parameter that has the most importance is the activation energy of the battery so a chemical parameter [10].

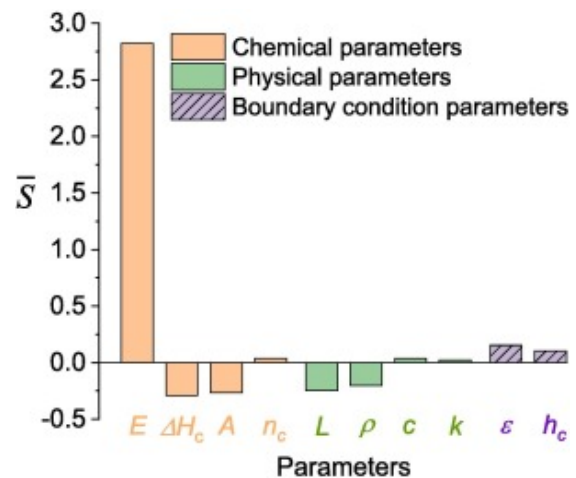


Figure 6. Sensitivity study of chemical physical and boundary condition parameters on self-heating ignition of a lithium-ion battery. Reproduced with permission from [10].

The state of charge has a large effect on the propensity of self-heating ignition. In fact, a pile of batteries 4 meters long would reach ignition conditions at an ambient temperature of 40°C for a state of charge of 80%, but 80°C for a 30% state of charge, as can be seen in Figure 7.

Furthermore, the effect of self-heating on the battery varies, based on the state of charge. For example, on a single LiCoO₂ battery, as can be also seen graphically in Figure 8 a greater state of charge causes larger physical damage to the battery once it reaches self-heating ignition. From state of charge of 80% and above, the battery is fully destroyed after thermal runaway. This is due to a larger energy present in the battery.

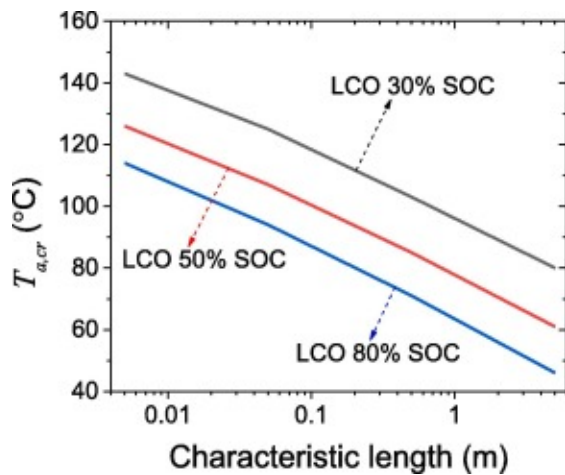


Figure 7 Ambient temperature required for the ignition of a fire from self-heating, with respect to characteristic length of the system, based on the state of charge of the batteries. Reproduced with permission from [10].

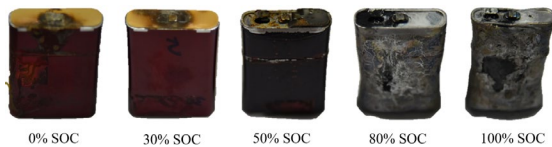


Figure 8. Effect of state of charge on the battery once it reaches thermal runaway from self-heating ignition. Reproduced with permission from [3], under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

The material with which the cathode of the battery is made also has a significant effect on the propensity of self-heating ignition: for example, as can be seen in Figure 9, where two different cathode materials, LiCoO_2 (LCO) and $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ (NCM) the NCM cathode is much less reactive and therefore less prone to self-heating ignition.

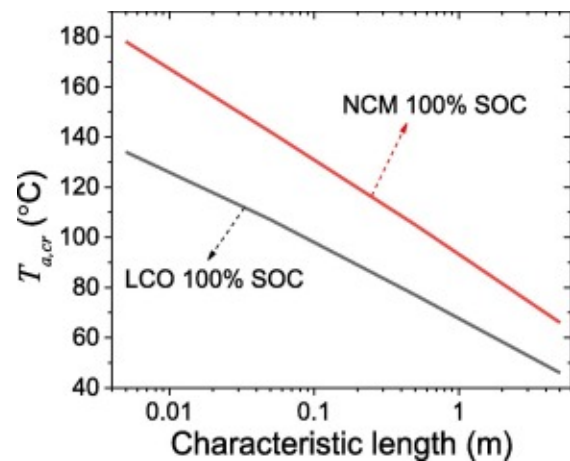


Figure 9. Ambient temperature necessary for self-heating ignition with a 100% state of charge for two different cathode materials LiCoO_2 (LCO) and $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ (NCM). Reproduced with permission from [10].

Finally, the last two effects to consider for self-heating ignition are how the kinetics change with increasing system sizes, and to changes in the configuration of storage or insulations. As shown graphically in Figure 10, a typical box of cells can contain 80 cells, a shelf of boxes 24 thousand cells, and a rack of shelves almost 2 million cells. In [11], it is demonstrated that using a multistep thermo-chemical model the heat transfer in the four different scenarios the self-heating behaviour of the system changes significantly. In fact, the model predicts that the self-heating ignition temperature reduces radically (from 155°C to 85°C going from a single battery to a rack of batteries). Furthermore, the model demonstrates that the mechanism that dominates the self-heating ignition goes from the reactions that happen on the positive electrode for the small ensembles, to the reactions that happen on the negative electrode for the larger ensembles. This means that the chemical parameters of importance change based on the size of the system being considered.

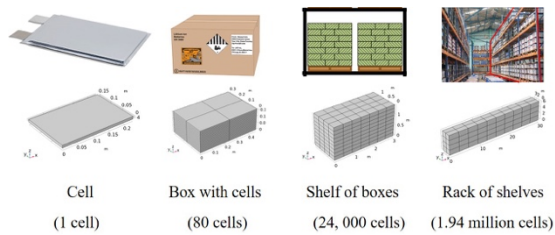


Figure 10. Four typical scenarios of storage of batteries, considered to study the effect of size of ensemble on type of internal reactions of the battery. Reproduced with permission from [13].

The effect of distancing within a box of batteries also has an effect, which is nonlinear.

As can be seen in Figures 11 and 12, the theoretical configuration in which a box is full of batteries without any spaces induces a greater dissipation of heat and would therefore be safer than a configuration with much space between the batteries, where the air would keep the heat. If instead of air, the space between the batteries was filled with an insulating material with a very low conductivity, this would result in a system more prone to self-heating ignition. Therefore, the configuration of boxes and the materials used become important parameters to consider.

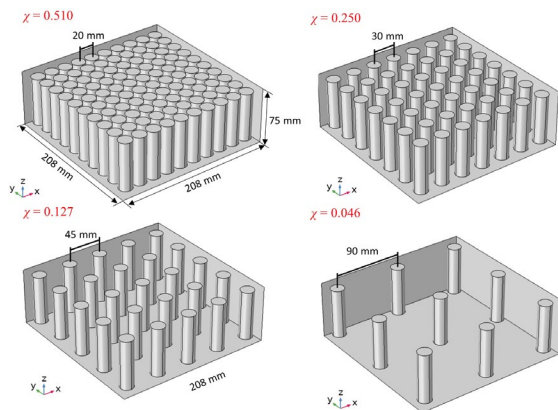


Figure 11 Different battery configurations, with the volume fractions based on the percent of battery present with respect to the empty space. Reproduced with permission from [11].

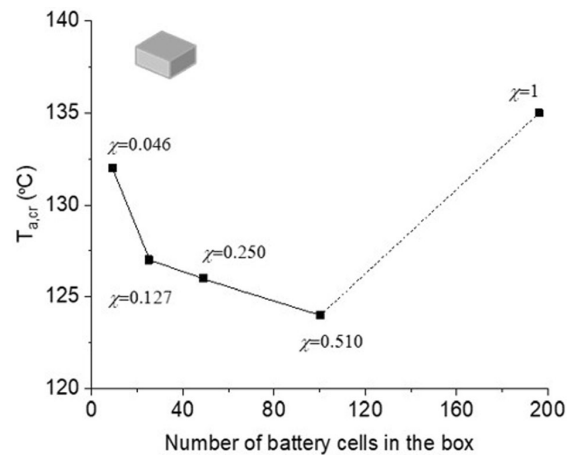


Figure 12 The effect of reduction of space between the batteries, and different packing configurations (based Figure 11). Reproduced with permission from [12], with Creative Commons Attribution 4.0 International License.

PERSPECTIVES ON THE FUTURE

Research and the lithium-ion battery industry have been working for years on the search of safer batteries, and a recent work on industry and research needs has highlighted the many current limitations and the future approaches that are needed [1]. Consequently, the final part of this article concentrates on summarising a few of the areas which the author thinks need a focus of energy from all the interested parties (industry, research, first responder community, and standardization community), in the five categories with technological solutions to increase the levels of safety of LIB cited in the introduction.

1. For compartmentation of battery fires there is a need to create more thermal barriers, to avoid that a single battery's ignition results in the failure of the whole system [13]. This objective can be reached through the invention of new chemistries or materials that would not result in thermal runaway of the battery with an increase in temperature or short circuit or through active control systems that suppress the thermal runaway before it leads to fires.

2. As mentioned at the start of this article, there is no standard and repeatable test method that covers the various methods of

abuse or failure of a battery. Even regarding the best method to induce a thermal runaway of a battery there is not a single method with which the various standards find consensus on [1]. For example, the test method for self-heating ignition does not even consider the heat transfer, but only chemical effects. Consequently, in general, there is an urgent need for harmonizing the standards, with more research on the methods with which short circuits inside a battery are developed, to then be able to develop a method to reproduce it in a stable way. Only then will we be able to include information such as the state of charge, the state of health, which accounts for the effects of ageing of the battery, and finally the dimensions of a system fully in the study of ignition and propagation of fires in the test or standard necessary for approval of the safety of a battery system.

3. For the prevention of these battery fires, there will be a need to develop methods to use performance based, like those existing and used in other areas of fire prevention.

4. Much work is needed around fire suppression for these types of fires. Currently the method of suppression of LIB fires varies from country to country, and each current method brings with it disadvantages. For reasons of space, they are not analysed in this paper, but can be found in references [5] and [1].

5. Finally, the area which has had a large advancement is that of early detection of possible failures and/or fires. Much of this article has concentrated on some of the limitations in using the voltage as a method of detection, but a combination of voltage, current, and temperature measurements could be for example implemented in the battery management system (BMS). Large developments in this area both in industry and in the research field are bringing the development of sensors outside of solely BMS to be able to develop an effective system of early warning.

A lot of work has been done highlighting the need for safer batteries moving forward, but just as much further work needs to be done to ensure that the ubiquitous uptake of lithium-ion batteries is safe and scalable.

BIBLIOGRAPHY

- [1] L. Bravo Diaz, X. He, Z. Hu, F. Restuccia, M. Marinesecu, J. Barreras, Y. Patel, G. Offer e G. Rein, «Meta-review of fire safety of Lithium-ion batteries: industry challenges and research contributions,» *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 167, n. 9, 2020.
- [2] P. Christensen, Z. Milojevic, M. S. Wise, M. Ahmeid, P. S. Attidekou, W. Mrozik, N. A. Dickmann, F. Restuccia, S. M. Lambert e P. K. Das, «Thermal and mechanical abuse of electric vehicle pouch cell modules,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 189, p. 116623, 2021.
- [3] X. He, F. Restuccia, Y. Zhang, Z. Hu, X. Huang, J. Fang e G. Rein, «Experimental Study of Self-heating Ignition of Lithium-Ion Batteries During Storage: Effect of the Number of Cells,» *Fire Technology*, vol. 56, pp. 2649-2669, 2020.
- [4] X. Feng, S. Zheng, D. Ren, X. He, L. Wang, H. Cui, X. Liu, C. Jin, F. Zhang, C. Xu, H. Hsu, S. Gao, T. Chen, Y. Li, T. Wang, H. Wang, M. Li e M. Oyuang, «Investigating the thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries based on thermal analysis database,» *Applied Energy*, vol. 246, pp. 53-64, 2019.
- [5] Q. Wang, B. Mao, S. Stolarov e J. Sun, «A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 73, pp. 95-131, 2019.
- [6] P. Ribiere, S. Grugeon, M. Morcrette, S. Boyanov, S. Laruelle e G. Marlair, «Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry,» *Energy & Environmental Science*, vol. 5, pp. 5271-5280, 2012.
- [7] J. Sun, J. Li, T. Zhou, K. Yang, S. Wei, N. Tang, N. Dang, H. Li, X. Qiu e L. Chen, «Toxicity, a

serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion battery,» *Nano Energy*, vol. 27, pp. 313-319, 2016.

- [8] P. Sun, R. Bisschop, H. Niu e X. Huang, «A review of Battery Fires in Electric Vehicles,» *Fire Technology*, vol. 56, pp. 1361-1410, 2020.
- [9] A. Baird, E. Archibald, K. Marr e O. Ezekoye, «Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas,» *Journal of Power Sources*, vol. 446, p. 227257, 2020.
- [10] X. He, Z. Hu, F. Restuccia, H. Yuan e G. Rein, «Self-heating ignition of large ensembles of Lithium-ion batteries during storage with different states of charge and cathodes,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 197, p. 117349, 2021.
- [11] Z. Hu, X. He, F. Restuccia, H. Yuan e G. Rein, «Numerical study of scale effects on self-heating ignition of lithium-ion batteries stored in boxes, shelves and racks,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 190, p. 116780, 2021.
- [12] Z. Hu, X. He, F. Restuccia e G. Rein, «Anisotropic and homogeneous model of heat transfer for self-heating ignition of large ensembles of lithium-ion batteries during storage,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 197, p. 117301, 2021.
- [13] Z. Hu, X. He, F. Restuccia e G. Rein, «Numerical Study of Self-Heating Ignition of a Box of Lithium-Ion Batteries During Storage,» *Fire Technology*, vol. 56, pp. 2603-2621, 2020.