



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DELLA SICUREZZA CIVILE E  
INDUSTRIALE

**Tesi di Laurea Magistrale in**  
**Ingegneria della Sicurezza Civile e Industriale**

**Valutazione dello stato dell'arte normativo sui  
rivestimenti esterni per l'incremento delle  
prestazioni energetiche dei fabbricati: punti di  
forza e di debolezza dell'attuale disposto  
normativo nazionale ed europeo.**

*Relatore: Prof. Ing. Vincenzo Puccia*

*Laureando: LUCA ZOCCO RAMAZZO*

ANNO ACCADEMICO 2018 – 2019



# Riassunto

In questo lavoro di tesi si valuta la completezza dell'attuale disposto normativo italiano ed europeo che fissa le condizioni di prova per la verifica delle capacità di resistenza al fuoco dei materiali impiegati in edilizia, evidenziandone eventuali mancanze.

Nello specifico, le norme di riferimento prese in considerazione per la redazione di quest'opera, e regolatrici dei metodi di verifica e della classificazione dei prodotti sono:

- UNI 8454:2010;
- UNI 8457:2010;
- UNI 9174:2010;
- UNI EN ISO 1182:2010;
- UNI EN ISO 13823:2008;
- UNI EN ISO 11925-2:2010;
- UNI EN 13501:2009.

Nel testo verranno analizzate nel dettaglio le metodologie di test in piccola scala capaci di classificare, secondo i recenti testi normativi, un qualsiasi prodotto da costruzione a seconda del suo grado di partecipazione a un incendio; i prodotti su cui verrà focalizzata l'attenzione saranno quelli dedicati allo specifico utilizzo in sistemi di facciata, molto spesso coinvolti in incendi disastrosi.

Prima di descrivere e discutere i principali metodi di verifica della reazione al fuoco dei materiali, in questo lavoro verranno delineate le proprietà caratteristiche dei prodotti da costruzione, i loro comportamenti alle alte temperature, e gli scenari di incendio innescati dal loro utilizzo errato e dai limiti della loro composizione.

Per sensibilizzare all'importanza della corretta verifica del grado di partecipazione di un prodotto all'incendio, viene riportata nel Capitolo 4 la descrizione di catastrofici scenari di incendio successi nel mondo.



# Indice

<b>INTRODUZIONE</b> .....	1
<b>CAPITOLO 1 - Panoramica della normativa italiana e comunitaria</b> .....	3
1.1 DIRETTIVA CEE 89/106 SUI PRODOTTI DA COSTRUZIONE .....	3
1.2 REGOLAMENTO DEI PRODOTTI DA COSTRUZIONE (UE): CPR 305/2011 .....	6
1.2.1 Decreto legislativo 16 giugno 2017 n.106.....	6
1.3 QUADRO NORMATIVO ITALIANO SULLA REAZIONE AL FUOCO .....	7
1.4 QUADRO NORMATIVO COMUNITARIO SULLA REAZIONE AL FUOCO .....	11
<b>CAPITOLO 2 - Caratterizzazione degli scenari di incendio esterni</b> .....	21
2.1 GENERALITÀ DEL FENOMENO .....	21
2.1.1 La combustione.....	22
2.1.2 L'incendio.....	26
2.1.3 Gli interventi di estinzione.....	28
2.2 SCENARI DI INCENDIO .....	30
2.2.1 Generalità e definizione .....	30
2.2.2 Criteri di scelta degli scenari di incendio.....	31
2.2.3 Meccanismi di propagazione dell'incendio sulle facciate .....	31
<b>CAPITOLO 3 - Il comportamento al fuoco dei materiali usati in edilizia civile</b> .....	39
3.1 EFFETTI DELLE ALTE TEMPERATURE SUI MATERIALI DA COSTRUZIONE .....	39
3.1.1 Il calcestruzzo .....	40
3.1.2L'acciaio .....	47
3.1.3Ilcalcestruzzo armato .....	48
3.1.4Il laterizio.....	51
3.2 I MATERIALI IGNIFUGHI PER RIVESTIMENTI ANTINCENDIO .....	52
3.2.1 PUR e PIR: schiuma di poliuretano e poliuretano espanso .....	54
3.2.2 Le resine fenoliche.....	56
3.2.3 EPS e XPS: polistirene espanso e polistirene estruso .....	57

3.2.4 PE: polietilene espanso .....	59
3.2.5 Prodotti minerali a base di fibra.....	59
3.2.6 L'aerogel.....	62
<b>CAPITOLO 4 - Eventi incidentali noti .....</b>	<b>63</b>
4.1 GRENFELL TOWER (LONDRA, INGHILTERRA).....	64
4.2 MARINA TORCH (DUBAI, EMIRATI ARABI UNITI).....	66
4.3 TORRE OLYMPUS (GROZNY, CECENIA).....	69
4.4 TVCC TELEVISION CULTURAL CENTRE (PECHINO, CINA) .....	71
4.5. ALTRI CASI DI INCENDIO CIVILE DI FACCIATA .....	72
<b>CAPITOLO 5 - Prove per la caratterizzazione del comportamento al fuoco dei materiali .....</b>	<b>75</b>
5.1 GENERALITÀ .....	75
5.2 PROVA DI NON COMBUSTIBILITÀ.....	76
5.3 UNDERWRITERS LABORATORIES 94 (UL 94).....	79
5.4 INDICE DI OSSIGENO (LOI).....	82
5.4.1 Descrizione dell'apparecchio di prova .....	83
5.4.2 Riflessioni sui parametri di prova.....	85
5.5 CALORIMETRO A CONO.....	86
5.5.1 Descrizione dell'apparato di prova .....	86
5.5.2 Parametri che si ricavano dalla prova .....	89
5.5.3 Procedura di prova.....	89
5.6 SBI (SINGLE BURNING ITEM).....	89
5.6.1 La strumentazione di prova .....	90
5.6.2 Procedura del test SBI .....	93
5.7 PICCOLA FIAMMA .....	95
5.7.1 L'apparecchiatura .....	95
5.7.2 Parametri del test .....	97
5.7.3 Iter di prova .....	99
5.8 PANNELLO RADIANTE .....	101
5.8.1 Descrizione dello strumento .....	102
5.8.2 Parametri del test .....	105
5.8.3 Procedure di prova.....	107

<b>CAPITOLO 6 - Riflessioni</b> .....	109
6.1 TEST IN PICCOLA SCALA E IN SCALA REALE .....	109
6.1.1 Comparazione tra prove in piccola scala o in scala reale. ....	113
<b>CONCLUSIONI</b> .....	119
<b>NOMENCLATURA</b> .....	121
<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b> .....	123





# Introduzione

La sicurezza antincendio degli edifici industriali e di civile abitazione rappresenta, ormai da anni, una priorità assoluta per i progettisti e gli ingegneri civili impegnati nella realizzazione di opere pubbliche e private.

Attraverso lo studio del fenomeno dell'incendio e del relativo effetto catastrofico che esso causa a costruzioni e occupanti, è stato proposto, negli ultimi 20 anni, un ampio quadro normativo in Unione Europea: l'intenzione di queste normative e dei regolamenti tecnici ad esse associate è quello di permettere al professionista incaricato di conseguire livelli minimi di sicurezza, al fine di preservare l'integrità delle costruzioni e dei servizi da loro offerti, e di garantire la salvaguardia della salute di chi vive nell'edificio.

Accanto alla sicurezza antincendio delle costruzioni, intese nella loro totalità, figura il bisogno di conoscere il reale grado di reazione al fuoco dei materiali per l'edilizia, necessario per poter descrivere il comportamento della struttura dove vengono impiegati.

La continua necessità di utilizzare prodotti da costruzione che abbiano raggiunto uno standard di prestazione e una classificazione imposti e prefissati, e il continuo aggiornamento delle norme europee e nazionali sulle costruzioni in ambito antincendio, sono fattori che non agevolano, al giorno d'oggi, il professionista incaricato alla realizzazione di un'opera.

Un altro problema che sorge analizzando le normative che regolamentano i test, lo studio e l'analisi delle prestazioni dei prodotti da costruzione quando esposti al fuoco risiede nel fatto che, nelle situazioni reali, sussistono condizioni al contorno impossibili da simulare in laboratorio.

I laboratori di prova sono quindi spesso obbligati a dover aggiornare i loro strumenti e le loro procedure di test di resistenza al fuoco per far fronte a quanto di nuovo rilasciato dalle più recenti norme EN e UNI riguardanti la modalità di esecuzione delle prove.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di analizzare un contesto normativo importante, ma molto spesso trascurato, al fine di riuscire a valutare l'adeguatezza ed eventuali mancanze del panorama normativo alla base delle tecniche e delle metodologie di prova dei materiali utilizzati in edilizia.

È evidente che riuscire a valutare ogni norma vigente per ogni tipo di prodotto e prova risulterebbe complesso: nel presente testo si è deciso quindi di concentrare l'attenzione

sulla sicurezza antincendio delle facciate degli edifici, analizzando i materiali utilizzati per la loro costruzione, per la loro riqualificazione e per la loro coibentazione antincendio.

Una volta presentati i principali prodotti da costruzione, i loro comportamenti quando esposti al fuoco, e gli scenari di incendio che possono scaturire dalla loro inadeguatezza, in questo testo verranno elencati, descritti e discussi i principali metodi di verifica della reazione al fuoco dei materiali.

Ogni tipologia di prova, eseguita in laboratori dedicati, sottostà a quanto riportato dalle relative normative europee EN e UNI (e quindi dalle leggi italiane armonizzate).

La conclusione del lavoro evidenzia la necessità di un nuovo quadro normativo.

Il Capitolo 1 riporta il contesto normativo europeo e nazionale per quel che concerne l'utilizzo dei prodotti da costruzione e la loro reazione al fuoco.

Il Capitolo 2 è dedicato alla presentazione generale del fenomeno incendio, dei meccanismi di innesco e propagazione e degli interventi necessari a contrastarlo. Vengono poi definiti gli scenari di incendio, e in coda al capitolo vengono presentati i meccanismi di propagazione dell'incendio sulle facciate.

Il Capitolo 3 è quello più teorico, dove viene discusso il comportamento al fuoco dei materiali usati in edilizia civile (calcestruzzo, acciaio, c.a., laterizio), presentando, per ciascuna tipologia di prodotto, i pregi e le criticità riscontrabili in caso di incendio. Dopo aver proposto gli effetti delle alte temperature su questi materiali, viene riportata la descrizione dei materiali chimici utilizzati nei rivestimenti e nelle opere di coibentazione antincendio.

Il Capitolo 4 riporta i più gravi casi di cronaca, che hanno visto protagonisti di enormi incendi di facciata alcuni edifici di grande altezza nel mondo negli ultimi anni, e, per ognuno, è stata sottolineata l'inadeguatezza dei materiali utilizzati.

Nel Capitolo 5 sono stati presentati i metodi di prova per la caratterizzazione del comportamento al fuoco dei materiali utilizzati in edilizia: è stata riportata la normativa referente e quanto essa prescrive per l'utilizzo della strumentazione di prova e per la procedura da seguire per la determinazione dei parametri risultanti.

Nel Capitolo 6, dopo aver presentato i limiti che i metodi di prova in piccola scala presentano e che solo quelli in scala reale sarebbero capaci di adempiere, viene sottolineata la necessità di un nuovo quadro normativo.

# Capitolo 1

## Panoramica della normativa italiana e comunitaria

Lo scopo di questo capitolo sarà quello di analizzare nel dettaglio le norme in vigore che regolamentano il comportamento di reazione al fuoco dei materiali in ambito nazionale italiano ed europeo (particolare attenzione sarà data alla reazione materiali utilizzati per la protezione passiva di elementi strutturali), così da potersi muovere in modo più agevole tra il quadro legislativo nazionale e il quadro legislativo comunitario e da individuare eventuali pregi e difetti dell'attuale sistema normativo.

La più recente definizione di reazione al fuoco è data dalla UNI CEI EN ISO 13943:2004, la quale afferma che *“la reazione al fuoco è il comportamento di un materiale che contribuisce con la propria decomposizione al fuoco a cui è sottoposto in condizioni determinate”*; essa è quindi una peculiarità del materiale che viene convenzionalmente classificata in classi di reazione al fuoco.

Tale classe di reazione al fuoco è uno strumento prescrittivo di protezione passiva antincendio.

Prima, però, di esaminare come la normativa antincendio si imponga ai produttori per regolamentare la prestazione di reazione al fuoco dei materiali, si introduce all'argomento offrendo una breve sintesi della panoramica della normativa sull'idoneità di sicurezza dei materiali da costruzione.

### 1.1 Direttiva CEE 89/106 sui prodotti da costruzione

Emanata il 21/12/1988 e rimasta in vigore fino al 24/04/2011, la direttiva europea 89/106/CEE, o direttiva prodotti da costruzione, comunemente detta CPD regolava l'impiego di tutti i prodotti, impianti e componenti descritti come *“materiale da costruzione”*, di cui all'Art. 1.2 se ne dava definizione: *“... è considerato “materiale da costruzione” ogni prodotto fabbricato al fine di essere incorporato o assemblato in modo permanente negli edifici e nelle altre opere di ingegneria civile”*: questo vuol dire che non tutti i prodotti da costruzione erano interessati dalla CPD ma era una norma destinata a

quei materiali impiegati nelle opere di costruzione intese come edifici ed opere di Ingegneria Civile; alcuni esempi in questo senso possono essere: gli inerti, il cemento, i solai, i pannelli isolanti, le porte, le finestre, le vetrate, gli elementi di sicurezza antincendio e gli accessori per la raccolta e la fornitura di acqua.

La CPD prevedeva la marcatura CE obbligatoria su tutti i prodotti; la sua pubblicazione si prefissava l'obiettivo di garantire requisiti essenziali per la sicurezza dell'opera finale nella quale i prodotti di costruzione fossero impiegati.

L'idea alla base della CPD fu l'adozione da parte degli stati membri dell'Unione Europea standard di prodotto tutti uguali, con l'intento di scavalcare i limiti tecnico-commerciali figli della diversificazione diffusa delle legislazioni di prodotto nazionali dei paesi dell'Unione Europea, che ostacolavano di fatto un'agevole circolazione dei prodotti di costruzione all'interno della Comunità.

Secondo la CPD sopra menzionata erano previsti sei modi di classificazione per i prodotti utilizzati in edilizia civile, (Tabella 1.1):

*Tabella 1.1. modi per ottenimento del marchio CE per i prodotti edili*

Sistema di attestazione	Compiti del produttore	Compiti dell'Organismo Notificato	Base per la marcatura CE
4	Prove iniziali di tipo sul prodotto  Controllo interno di produzione	-	Dichiarazione di conformità del Prodotto
3	Controllo interno di produzione	Prove iniziali di tipo sul prodotto	
2	Prove iniziali di tipo  Controllo interno di produzione	Certificato del controllo interno di produzione in base all'ispezione iniziale	Dichiarazione di conformità del produttore basata sul certificato di conformità del controllo interno di produzione

2+	<p>Prove iniziali di tipo</p> <p>Controllo interno di produzione (prove su campioni secondo programma di prove stabilito)</p>	<p>Certificato del controllo interno di produzione in base all'ispezione iniziale e alla sorveglianza continua, valutazione ed approvazione del controllo di produzione</p>	
1	<p>Controllo interno di produzione</p> <p>Prove su campione secondo programma di prove stabilito</p>	<p>Prove iniziali di tipo</p> <p>Ispezione iniziale del controllo interno di produzione</p> <p>Sorveglianza continua, valutazione ed approvazione del controllo di produzione</p> <p>Certificato di Conformità in base ai compiti dell'Organismo Notificato e ai compiti assegnati al produttore</p>	<p>Dichiarazione di conformità del produttore basata sul certificato di conformità del prodotto</p>
1+	<p>Controllo interno di produzione</p> <p>Prove su campione secondo programma di prove stabilito</p>	<p>Prove iniziali di tipo</p> <p>Ispezione iniziale del controllo interno di produzione</p> <p>Sorveglianza continua, valutazione ed approvazione del controllo di produzione</p> <p>Prove di verifica di campioni</p> <p>Certificato di Conformità in base ai compiti dell'Organismo Notificato e ai compiti assegnati al produttore</p>	

Nel nostro paese la CPD fu introdotta con il DPR n. 246 del 21 aprile 1993.

Dal 2 aprile dell'anno 2011 entra in vigore parziale il Regolamento dei Prodotti da Costruzione (CPR); la CPD è rimasta attiva fino al primo luglio di due anni dopo, quando è entrato in vigore il Regolamento Europeo 305/2011 che di fatto presenta la Dichiarazione di prestazione (ex dichiarazione di conformità) e revoca la vecchia direttiva.

## **1.2 Regolamento dei prodotti da costruzione (UE): CPR 305/2011**

Il CPR n. 305/2011 ha preso il posto di quel che era la direttiva 89/196/CEE sui materiali impiegati in edilizia, fissando le condizioni armonizzate per la commercializzazione dei suddetti materiali.

La norma armonizzata è una tecnica particolare su cui si basa un ente di normazione europeo - CEN, CENELEC, ETSI – fondato su un mandato della Commissione CE, nel panorama di orientamenti e procedure prestabiliti.

Ciò che maggiormente il nuovo regolamento ha stravolto è la definizione di Marcatura CE, precedentemente definita come “*Attestazione della Conformità (89/106/CEE) Inteso nel senso espresso dal Reg. (UE) 765/2008 Art.1 comma 2 (Salute, sicurezza e protezione per persone, animali e ambiente)*”, mentre adesso definita in funzione dell'idea di *dichiarazione di Prestazione e di costanza della Prestazione*: la marcatura CE di un di un materiale impiegato in edilizia deve dare prova delle capacità intrinseche fisiche e chimiche di un prodotto da costruzione con lo specifico intento di poterlo utilizzare in assoluta sicurezza in un'opera civile, allargando quindi il concetto di sicurezza all'intero corpo edilizio, e non unicamente, in senso stretto, al singolo prodotto da costruzione.

Il Regolamento CPR è entrato in vigore il 1 luglio 2013, introducendo, oltre ai chiarimenti appena esposti sul concetto della marcatura CE, anche metodi, modelli e procedure ideate con lo scopo di ridimensionare i costi sostenuti dalle Piccole e Medie imprese.

Fondamentale per il CPR è il concetto di Dichiarazione di prestazione (DoP), che permette a colui che produce il materiale di elencare i dati sulle caratteristiche intrinseche del prodotto che verrà successivamente posto in commercio: in questo modo il fabbricante si assume la responsabilità della conformità del prodotto da costruzione.

### **1.2.1 Decreto legislativo 16 giugno 2017 n.106**

Il D.Lgs 16 giugno 2017 n.106 rappresenta l'adeguamento italiano in base a quanto descritto nel Regolamento CPR n. 305/2011, ed entra in vigore il 9/08/2017.

Il Testo in questione riscrive la normativa italiana sui prodotti utilizzati in edilizia alle nuove condizioni fissate in Europa, snellendola e dettando le regole di mercato: la finalità di quanto appena detto risiede nella volontà di preservare la qualità delle costruzioni e la loro sicurezza.

In breve, le nuove regole sui materiali da costruzione condizionano una più severa responsabilità per i produttori, imponendo nuove multe pecuniarie per chi viene colto ad impiegare prodotti che risultano essere non idonei al Regolamento UE.

### **1.3 Quadro normativo italiano sulla reazione al fuoco**

L'impiego di prodotti che risultano avere una determinata classe di reazione al fuoco è spinto dalla volontà di ridurre la velocità di diffusione delle fiamme, l'intensità e la durata dell'incendio, in modo che:

- Non vengano interessati altri prodotti e oggetti combustibili presenti durante un incendio;
- Sia permessa la sicura evacuazione degli occupanti di un edificio prima che si raggiunga il momento di flash-over;
- Possa essere effettuato l'intervento delle squadre di soccorso in favore di una più agevole evacuazione degli occupanti e per la salvaguardia di oggetti e dei servizi connessi alla struttura.

Il D.M. 26 giugno dell'anno 1984 sanciva ciò che necessario risultava essere per la classificazione di reazione al fuoco e per l'omologazione dei prodotti da costruzione utilizzati in edilizia civile, senza considerare i rischi connessi alla possibile produzione dai fumi.

Esaminando nel dettaglio il D.M. 26 giugno 1984, venivano classificati i materiali incombustibili con la classe 0, e quelli combustibili con le classi 1, 2, 3, 4, 5 al crescere del loro grado di coinvolgimento alla combustione (Classificazione Italiana UNI 9177).

Il comportamento in caso di incendio di un prodotto da costruzione classificato come combustibile era quindi tanto migliore quanto più bassa era la classe che corrispondeva al prodotto stesso.

La classe di reazione al fuoco era il risultato di una successione di prove e test, da cui dipendeva inevitabilmente l'omologazione di questi materiali.

I report di prova erano allora emessi dal Ministero dell'Interno o dai laboratori legalmente incaricati dal Ministero dell'Interno.

Il Ministero dell'Interno aveva il compito di rilasciare in un secondo momento l'autorizzazione a poter fabbricare ufficialmente, e poi vendere, il prodotto.

I dettagli dell'omologazione erano contenuti in un documento che riportava la dichiarazione di conformità, grazie a cui era possibile allora certificare la conformità del materiale. Essa conteneva inoltre i dati e i limiti dell'omologazione.

Tramite la dichiarazione di conformità si ha il diritto di poter marchiare il prodotto con un marchio di conformità, cioè un'indicazione fissa e duratura che consenta di riconoscere le proprietà del prodotto stesso, come:

- Nome del produttore;
- Anno di produzione;
- Classe di reazione al fuoco;
- Estremi di omologazione.

L'omologazione del materiale ha una validità di 5 anni, e il produttore può domandarne il rinnovo una volta terminato questo periodo di validità. A questo punto però non rimangono necessarie le ripetizioni dei test, a meno che i metodi di prova non risultino essere cambiati, o se il produttore non rilascia dichiarazione che possa testimoniare che il materiale non è stato mutato rispetto alla prima omologazione.

Il ministero dell'interno ha il potere decisionale sul ritiro dell'omologazione di un prodotto se viene effettivamente rilevata una classificazione di reazione al fuoco non idonea dopo specifici test di controllo, oppure risulta una evidente disuguaglianza del prodotto da costruzione rispetto al provino che era stato omologato in precedenza 5 anni prima.

Nel caso in cui dovesse essere necessario respingere la domanda di conformità per i motivi appena descritti, il produttore non potrebbe avere più il diritto di apporre il marchio di conformità al materiale in questione.

In riferimento a quanto riportano i Decreti Ministeriali D.M. 26/06/1984 e D.M. 3/09/2001, per poter riconoscere l'opportuna classe di reazione al fuoco dei prodotti da costruzione definiti combustibili bisogna sottoporre i materiali alle seguenti prove di laboratorio in piccola scala:

Per poter invece classificare un prodotto di costruzione incombustibile (classe 0) è necessario sottoporre il prodotto oggetto della prova al test le cui caratteristiche di esecuzione sono definite nella norma:



- ISO-DIS 1182 (UNI-ISO 1182) (Capitolo §5.2): prova di non combustibilità, in cui si valutano l'incremento di temperatura,  $\Delta T$  [°C], la perdita di massa,  $\Delta m$  [%], e la durata delle fiamme continue  $t_f$  [s];

La classificazione in classe 0 fu data ai soli prodotti da costruzione che riuscirono a superare i valori limite definiti per la prova di non combustibilità UNI ISO 1182. I materiali combustibili, che quindi non riuscirono a superare tali valori limite, vennero allora sottoposti in successione alle prove di piccola fiamma (UNI 8456 o UNI 8457) e di pannello radiante (UNI 9174).

Queste prove permettono la determinazione di parametri definiti, come la propagazione della fiamma, la sua velocità, la velocità di post-combustione e l'eventuale gocciolamento di parti ardenti. Seguendo quanto riportano le norme UNI 9176 (—Preparazione dei materiali per l'accertamento delle caratteristiche di reazione al fuoco”) e UNI 9177 (—Classificazione di reazione al fuoco dei materiali combustibili”) è allora possibile ottenere una classificazione da 1 a 5.

All'articolo decimo, il Decreto Ministeriale emanato il 26 giugno dell'84 elenca i metodi di prova al fine di poter classificare i materiali da costruzione, nel caso in cui non si intenda procedere con la loro omologazione: sono destinati a questo tipo di valutazione tutti quei prodotti in opera al momento dell'emanazione del decreto, i materiali destinati a impieghi particolari o che sono destinati ad essere impiegati per periodi di tempo di durata limitata, e i prodotti in “tiratura” ristretta.

Verrà successivamente mandata al C.S.E. (o a qualsiasi altro ente di verifica o laboratorio che sia riconosciuto dalle autorità europee di competenza) la richiesta di valutazione del prodotto, con l'apposito allegato riportante la scheda tecnica.

La campionatura dei prodotti e la relazione della scheda relativa al materiale e che ne riporta le principali caratteristiche devono passare l'indagine effettuata dal C.S.E. oppure, nel caso in cui venga presentata ufficialmente una domanda apposita, sarà compito del comando provinciale dei Vigili del fuoco referente procedere all'indagine.

Con l'emanazione del Decreto Ministeriale rilasciata il 14 gennaio dell'85 entra per legge in vigore la classificazione in classe di reazione all'incendio di livello 0 di alcuni prodotti, e, sempre in riferimento alla norma sopracitata, fu stabilito che per tale classificazione non erano necessari test di non combustibilità.

I materiali di impiego edile che vengono indicati come classificati in classe 0 per definizione sono:

- Prodotti destinati all'impiego in costruzione, composti di ossidi metallici (ossido di calcio, magnesio, ed altre ossidazioni) o di composti di natura non organica, come i carbonati, i silicati di calcio e altri tipi di composti;
- Prodotti riconosciuti come isolanti realizzati in fibre minerali; alcuni esempi in riferimento possono essere i materiali confezionati in fibra di roccia, di vetro o ceramiche, che risultino di fatto esenti da qualsiasi legame di natura organica;
- Prodotti metallici in presenza o meno di relativa finitura applicata alla superficie di natura non organica.

Con la pubblicazione del D.M. 10 marzo 2005 e del D.M. 15 marzo 2005 sono state recepite le Euroclassi europee, e venivano definite le classificazioni di reazione al fuoco comparando le classi italiane e quelle europee; i decreti sopracitati definiscono inoltre i criteri e le metodologie di prova sui prodotti da costruzione, di cui parleremo successivamente al Capitolo §5.

Nello specifico, il D.M. pubblicato il 10 marzo 2005 recepisce quindi la classificazione contenuta dalla UNI EN 13501-1 che stabiliva le modalità per poter classificare la reazione al fuoco dei materiali edili.

Ad esclusione di tutti i materiali da costruzione già effettivamente sottoposti alla verifica di una relativa normativa europea di riferimento (aventi quindi l'obbligo della marcatura CE), occorre in Italia, ad oggi, una modalità che possa portare all'omologazione nazionale secondo i decreti sopra menzionati.

Di fatto la classificazione emanata dalla Commissione europea sta prendendo il posto della classificazione che ciascun Paese Membro aveva previsto per i materiali impiegati nelle costruzioni di tipo edile.

Per quanto riguarda il D.M. 15 marzo 2005, esso introduce alcune tabulazioni con lo scopo di paragonare le classi nazionali con le classi in uso nell'Unione: in questo modo il professionista o il laboratorio competente è vincolato per legge a ricorrere ad una specifica tipologia di prova per ogni una determinata classe di reazione al fuoco.

In questo senso si riporta nella Tabella 1.2 la comparazione fra classi italiane ed europee secondo il D.M. 15 marzo 2005, riferita nel caso specifico ai materiali destinati all'impiego a parete (la norma riporta anche le comparazioni per impieghi a pavimento ed a soffitto):

**Tabella 1.2.** Comparazione fra classi italiane ed europee, secondo il D.M. 15 marzo 2005

	Classe Italiana	Classe Europea
I	Classe 1	(A2-s1, d0), (A2-s2,d0),(A2-s3, d0), (A2-s1, d1), (A2-s2,d1), (A2-s3,d1), (B-s1,d0), (B-s2, d0), (B-s1,d1), (B-s2,d1)
II	Classe 2	(A2-s1, d2), (A2-s2,d2),(A2-s3, d2), (B-s3,d0), (B-s3, d1), (B-s1,d2), (B-s2,d2), (B-s3, d2), (C-s1, d0), (C-s2, d0), (C-s1, d1), (C-s2,d1)
III	Classe 3	(C-s3,d0), (C-s3,d1), (C-s1, d2), (C-s2, d2), (C-s3, d2), (D-s1, d0), (D-s2, d0), (D-s1, d1), (D-s2,d1)

Risulta ovvio che la classificazione in base al grado di partecipazione all'incendio richiesta per l'utilizzo effettivo dei prodotti da costruzione è normata di fatto da leggi antincendio che già disciplinano le singole attività soggette al controllo dei Vigili del Fuoco, in relazione all'impiego particolare e alla destinazione delle strutture.

#### **1.4 Quadro normativo comunitario sulla reazione al fuoco**

La Commissione Europea ha pubblicato una successione di disposizioni, recepite in Italia attraverso l'approvazione del D.M. 15 marzo 2005, con lo scopo preciso di armonizzare quanto già in vigore per quel che riguarda i materiali edilizi: le disposizioni sono la Direttiva 89/106/CEE, le Decisioni 2000/147/CE e la 2003/632/CE. Vengono così rilasciati agli Stati Membri le modalità di determinazione del rischio e la libera opportunità di catalogare i loro prodotti in base al grado di partecipazione all'incendio, con un criterio che risultasse essere lo stesso per tutti i Paesi Membri.

Un'importante svolta si ottiene con il Regolamento Prodotti da Costruzione UE N. 305/2011, entrato in vigore al posto della precedente direttiva sui prodotti da costruzione 89/106/CEE, che semplifica e svincola la libera circolazione dei materiali da costruzione all'interno del mercato, senza però far scemare il livello di sicurezza che si era raggiunto fino a quel momento; il CPR 305/2011 si avvale invece di uno stesso quadro legislativo per accelerare le operazioni di produzione di materiali e tecnologie di cui il settore edile potesse usufruire per prosperare.

La novità che il CPR 305/2011 è riuscito ad implementare è stata la definizione di 7 requisiti dei prodotti di costruzione (fra i quali la sicurezza in caso d'incendio); in base all'adempimento rispettato dei 7 requisiti, alle caratteristiche del materiale e ad altre informazioni sul materiale in oggetto, il produttore può pubblicare la Dichiarazione di Prestazione, sempre se il materiale in questione risulti essere sottoposto a verifica da parte di una norma armonizzata (EN) o da una valutazione tecnica europea (ETA).

Al termine di questo iter processuale, nel caso in cui il prodotto risulti essere compatibile con quanto indicato nella normativa, il produttore avrà il diritto di marcare con la Marcature CE il materiale in oggetto.

Non bisogna però confondere il CPR come una direttiva: il CPR 305/2011 è un regolamento, e per tanto non necessita di relativo recepimento nelle legislature dei Paesi Membri, ma vincola soltanto i produttori alla marcatura CE nel caso in cui i prodotti risultino essere normati da leggi armonizzate o valutazioni tecniche europee.

In Italia è per tali motivi necessaria l'omologazione nazionale dei prodotti da costruzione con il processo descritto qui sopra, ad eccezione di quei prodotti che sono di fatto vincolati dall'obbligo di marcatura CE.

Concentrandosi su uno dei 7 requisiti sopracitati, quello della sicurezza antincendio di un prodotto, esso vuole:

- Assicurare la capacità portante della struttura per un prefissato periodo di tempo;
- Circoscrivere la produzione e la successiva propagazione delle fiamme e del fumo all'interno della struttura;
- Impedire la diffusione delle fiamme ad edifici limitrofi;
- Consentire una sicura evacuazione dall'edificio, uno scorrevole esodo degli abitanti, agevolando quindi le manovre di soccorso in sicurezza;
- Preservare la sicurezza dei soccorritori;
- Limitare la quantità e l'ingenza dei danni ai materiali e ai servizi relativi alla struttura.

Attraverso la disposizione dei requisiti associati agli elementi della struttura e ai materiali che la compongono, il regolamento CPR 305/2011 fissa i criteri uniformi per la determinazione e la stima del rischio incendio, tenendo in considerazione la diversificazione di esigenze che ogni Stato Membro per legge ha.

La norma europea che regola la classificazione di reazione al fuoco degli elementi da costruzione è la UNI EN 13501-1:2009.

La terna di tipologie di prodotti edilizi alla quale la UNI EN 13501-1 si rivolge è composta da:

- Materiali da costruzione (esclusi pavimenti e prodotti isolanti lineari) classificati come:
  - o Classe A – materiali non combustibili;
  - o Classi B, ... , E - materiali che prendono fuoco, classificati da A2 a E col diminuire della loro proprietà ignifuga;
  - o Classe F – Prodotti di cui non si sa la prestazione (NPD) o che non vengono classificati con la Classe E;
  - o Classe E - Materiale accettabile, che resiste bene per un periodo all'esposizione all'incendio.
- Pavimenti (vengono nella normativa indicati con FL);
- Prodotti isolanti lineari (vengono nella normativa indicati con L).

Nella UNI EN 13501-1, oltre alle lettere maiuscole delle classi (A, B, C...) che classificano il materiale in base al suo grado di partecipazione al fenomeno incendio, vengono aggiunti due parametri:

- Parametro s (in riferimento all'emissione di fumi), che si divide a sua volta nei parametri s1, s2, s3 che definiscono l'aumentare della densità ottica dei fumi (Tabella 1.3).
- Parametro d (in riferimento al fenomeno del gocciolamento), che definisce l'entità del gocciolamento o parti fuse che nascono durante il fenomeno dell'incendio e contribuiscono alla sua propagazione (Tabella 1.3); si divide a sua volta nei parametri d0, d1, d2 al crescere del fenomeno.

Difformemente a quanto previsto dalla normativa nazionale, questo indice permette di descrivere l'attitudine del prodotto da costruzione a sviluppare gocce o particelle incandescenti.

**Tabella 1.3.** Parametri relativi all'emissione di fumi e al gocciolamento

s1	Scarsa emissione di fumo
s2	Moderata emissione di fumo
s3	Forte emissione di fumo
d0	Assenza di gocce incendiate o frammenti accesi
d1	Poche gocce incendiate e/o particelle incandescenti, che comunque si spengono entro 10 s

d2	Molte gocce incendiate e/o particelle incandescenti, che non si spengono entro 10 s
----	---

I parametri e la simbologia prevista dalla norma si riportano in Tabella 1.4:

*Tabella 1.4. Parametri e simbologia*

$\Delta T$	Aumento di temperatura (Incremento massimo di temperatura misurato durante la prova EN ISO 1182)
$\Delta m$	Perdita di massa (perdita di massa a seguito della prova, espressa come percentuale della massa iniziale del provino, rilevata durante la prova EN ISO 1182)
PCS	Potenziale calorifico superiore (potere calorifico lordo, quindi non al netto del calore latente di vaporizzazione dell'acqua formata del prodotto, in riferimento alla EN ISO 1716)

FIGRA	<p>Tasso di incremento dell'incendio (acronimo di Fire Growth Rate, è il massimo del rapporto fra la velocità di sviluppo del calore da parte del provino e il tempo a cui si osserva tale massimo, misurato nella prova EN 13823, SBI.</p> <p>È il parametro impiegato da EN 13501-1 per valutare la dinamica dello sviluppo di calore (maggiore è il valore di FIGRA, più rapida è la liberazione della quantità di potenza termica)</p>
THR <sub>600s</sub>	<p>Rilascio totale di calore (acronimo di Total Heat Release, è il calore totale prodotto dalla combustione di un provino durante la prova EN 13823 (SBI) nei primi 10 minuti di esposizione al bruciatore di prova.</p> <p>È il parametro impiegato da EN 13501 per valutare il contributo all'incendio del materiale, in termini di energia rilasciata)</p>
LFS	<p>Propagazione laterale del fuoco (è un parametro rilevato visivamente durante la prova EN 13823 ("SBI") e indica se il fuoco è arrivato alla fine del campione, nel punto più esterno possibile</p>

SMOGRA	Tasso di incremento del fumo (acronimo di Smoke Growth Rate: in maniera analoga a FIGRA, è il massimo del rapporto fra la velocità di sviluppo del fumo da parte del provino e il tempo a cui si osserva tale massimo, misurato nella prova EN 13823 (SBI). il parametro impiegato da EN 13501-1 per valutare la dinamica dello sviluppo di fumo (maggiore è il valore di SMOGRA, e più rapida è la liberazione di una data quantità di fumo da parte del materiale). la liberazione della quantità di potenza termica)
TSP <sub>600s</sub>	Produzione totale di fumo (acronimo di Total Smoke Production: analogamente a THR <sub>600</sub> è la quantità totale di fumo prodotta da un provino nella prova EN 13823 (SBI) nei primi 10 minuti di esposizione al bruciatore di prova)
Fs	Propagazione del fuoco (rappresenta la lunghezza (in mm) coperta dalla fiamma nella prova EN ISO 11925-2, nel tempo di prova specificato)

I prodotti di costruzione che necessitano per legge dell'applicazione di Marcatura CE sono quindi gli stessi che hanno come requisito prerogativo la sicurezza in caso di incendio; la classificazione in relazione a quanto prescritto dalla norma fonda le sue ragioni su report di prova relativi a specifici test che la Commissione Europea di Normalizzazione (CEN) ha fissato come prestabiliti. Essi sono:



- UNI EN ISO 1182: Prova di non combustibilità;
- UNI EN ISO 1716: Misura del PCS potere calorifico superiore;
- UNI EN 13823: Prova di esposizione termico mediante un SBI;
- UNI EN ISO 11925-2: Prova di infiammabilità per contatto diretto di fiamma;
- UNI EN ISO 9239-1: Prova di comportamento al fuoco dei pavimenti con l'utilizzo di una fonte di calore

Le Classi di reazione al fuoco e metodi di prova relativi a ciascuna classe vengono riassunti nella tabella seguente (Tabella 1.5):

*Tabella 1.5. Classi di reazione al fuoco e metodi di prova secondo la UNI EN 13501-1*

A1	UNI EN ISO 1182 UNI EN ISO 1716	[-]
A2	UNI EN ISO 1182 o UNI EN ISO 1716 UNI EN ISO 13823 (SBI)	[-]
B	UNI EN ISO 13823 (SBI) UNI EN ISO 11925 (esposizione 30'')	Classificazioni aggiuntive: produzione di fumo, gocce/particelle ardenti
C	UNI EN ISO 13823 (SBI) UNI EN ISO 11925 (esposizione 30'')	Classificazioni aggiuntive: produzione di fumo, gocce/particelle ardenti
D	UNI EN ISO 13823 (SBI) UNI EN ISO 11925 (esposizione 30'')	Classificazioni aggiuntive: produzione di fumo, gocce/particelle ardenti
E	UNI EN ISO 13823 (SBI) UNI EN ISO 11925 (esposizione 15'')	Classificazioni aggiuntive: produzione di fumo, gocce/particelle ardenti

F	Reazione non determinata
---	--------------------------

In seguito entreremo più nello specifico analizzando le prove nel dettaglio (Capitolo §5).

Vengono ora trascritte le tabelle che secondo la UNI EN 13501-1 sanciscono la prestazione del prodotto edilizio, come risultato delle prove effettuate; per stabilire in quale classe poter classificare un prodotto da costruzione si fa quindi riferimento ai valori riportati in tabella 1.6 (presa direttamente dalla UNI EN 13501-1):

*Tabella 1.6. Prestazioni delle classi di reazione al fuoco*

Classe	Metodo di prova	Criteri di classificazione	Classificazion e aggiuntiva
A1	EN ISO 1182 <sup>(1)</sup>	$\vartheta_T \delta 30^\circ\text{C}$ ; $\vartheta_m \delta 50\%$ e $t_f = 0$ (cioè incendio non persistente)	[-]
	EN ISO 1716	PCS $\delta 2,0 \text{ MJ/kg}$ ; <sup>(1)</sup> PCS $\delta 2,0 \text{ MJ/kg}$ ; <sup>(2)(2a)</sup> PCS $\delta 1,4 \text{ MJ/m}^2$ ; <sup>(3)</sup> PCS $\delta 2.0 \text{ MJ/kg}$ ; <sup>(4)</sup>	[-]
A2	EN ISO 1182 <sup>(1)</sup>	$\vartheta_T \delta 30^\circ\text{C}$ ; $\vartheta_m \delta 50\%$ e $t_f \delta 30\text{s}$	[-]
	EN ISO 1716	PCS $\delta 3,0 \text{ MJ/kg}$ ; <sup>(1)</sup> PCS $\delta 4,0 \text{ MJ/kg}$ ; <sup>(2)(2a)</sup> PCS $\delta 4,0 \text{ MJ/m}^2$ ; <sup>(3)</sup> PCS $\delta 3.0 \text{ MJ/kg}$ ; <sup>(4)</sup>	[-]
	EN 13823 (SBI)	FIGRA $\delta 120\text{W/s}$ ; LFS margine del campione; THR <sub>600s</sub> $\delta 7.5 \text{ MJ}$	Produzione di fumo <sup>(5)</sup> , e gocce e particelle ardenti <sup>(6)</sup> .

B	EN 13823 (SBI)	FIGRA $\delta$ 120W/s; LFS margine del campione; THR <sub>600s</sub> $\delta$ 7.5 MJ	Produzione di fumo <sup>(5)</sup> , e gocce e particelle ardenti <sup>(6)</sup> .
	EN ISO 11925-2 <sup>(8)</sup> <i>Esposizione- 30s</i>	Fs $\delta$ 150 mm entro 60s	
C	EN 13823 (SBI)	FIGRA $\delta$ 250W/s; LFS margine del campione; THR <sub>600s</sub> $\delta$ 15 MJ	Produzione di fumo <sup>(5)</sup> , e gocce e particelle ardenti <sup>(6)</sup> .
	EN ISO 11925-2 <sup>(8)</sup> <i>Esposizione- 30s</i>	Fs $\delta$ 150 mm entro 60s	
D	EN 13823 (SBI)	FIGRA $\delta$ 750W/s	Produzione di fumo <sup>(5)</sup> , e gocce e particelle ardenti <sup>(6)</sup> .
	EN ISO 11925-2 <sup>(8)</sup> <i>Esposizione- 30s</i>	Fs $\delta$ 150 mm entro 60s	
E	EN ISO 11925-2 <sup>(8)</sup> <i>Esposizione- 15s</i>	Fs $\delta$ 150 mm entro 20s	Gocce e particelle ardenti <sup>(7)</sup> .
F	Reazione non determinata		

(\*) Le classi di cui alla presente tabella sono attribuite in conformità a quanto specificato dalla norma EN 13501-1.

(1) Per i prodotti omogenei e componenti sostanziali di prodotti non omogenei.

(2) Per qualsiasi componente esterno non sostanziale di prodotti non omogenei.

(2a) Alternativamente, qualsiasi componente esterno non sostanziale avente un PCS  $\delta$  2,0 MJ/m<sup>2</sup>, purché il prodotto soddisfi i seguenti criteri di EN 13823 (SBI): FIGRA  $\delta$  20 W/s; e LFS margine del campione; e THR<sub>600s</sub>  $\delta$  4.0 MJ; e s1; e d0.

(3) Per qualsiasi componente interno non sostanziale di prodotti non omogenei.

(4) Per il prodotto nel suo insieme.

(5) s1 = SMOGRA  $\delta$  30m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> e TSP<sub>600s</sub>  $\delta$  50m<sup>2</sup>; s2 = SMOGRA  $\delta$  180 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> e TSP<sub>600s</sub>  $\delta$  200m<sup>2</sup>; s3 = non s1 o s2.

(6) d0 = assenza di gocce/particelle ardenti in EN 13823 (SBI) entro 600s; d1 = assenza di gocce/particelle ardenti di durata superiore a 10s in EN 13823 (SBI) entro 600s; d2 = non d0 o d1; la combustione della carta in EN ISO 11925-2 dà luogo a una classificazione in d2.

(7) Superamento della prova = assenza di combustione della carta (non classificato). Mancato superamento della prova = combustione della carta (classificato in d2).

(8) Quando le fiamme investono la superficie e se adeguato alle condizioni finale di applicazione del prodotto, la parte laterale (di un oggetto).

# Capitolo 2

## Caratterizzazione degli scenari di incendio esterni

### 2.1 Generalità del fenomeno

L'incendio è un particolare regime di combustione non controllata, ed il cui sviluppo è condizionato dalla configurazione del combustibile e della sua interfaccia con l'ambiente esterno.

A seconda delle reazioni di tipo chimico o delle trasformazioni fisiche che in presenza di fiamma si possono verificare, ogni prodotto è caratterizzato da un particolare tipo di comportamento al fuoco. Il comportamento al fuoco di un materiale condiziona la propagazione delle fiamme in caso di incendio ed è influenzato da:

- Tipo di materiale;
- Innesco;
- Forma dell'oggetto;
- Posizione dell'oggetto rispetto alla fiamma;
- Umidità relativa;
- Infiammabilità dei gas e delle particelle che nascono durante il fenomeno.

Si fornisce ora la definizione di reazione al fuoco e di resistenza al fuoco: si parla di *Reazione al fuoco* per definire il grado di coinvolgimento di un combustibile al fenomeno incendio; si definisce invece la *Resistenza al fuoco* come l'attitudine di un prodotto di preservare nel tempo la stabilità, la tenuta e l'isolamento termico prefissati.

Si definisce combustibile quella sostanza solida, liquida o gassosa che brucia a seguito di una reazione con l'ossigeno contenuto nell'aria (comburente). Il comburente è quindi quel reagente che si combina col combustibile permettendo la combustione e disciplinando la velocità di combustione del combustibile stesso: più comburente è presente, più cresce la velocità di combustione.

Tenendo in considerazione il tipo di combustibile, in riferimento all'Allegato V del D.M. 10/03/1998 punto 5.1, viene riportata la "classificazione degli incendi".

Nel Testo unico viene rilasciata la seguente definizione di incendio: “Per incendio si intende una combustione di materiali, autoalimentata, che si sviluppa senza controllo nel tempo e nello spazio”. (*definizione tratta dal Decreto Ministeriale 14 settembre 2005*).

Si verifica il fenomeno di autocombustione di un combustibile nel caso di ignizione dell'incendio senza che venga fornita energia da alcun mezzo esterno.

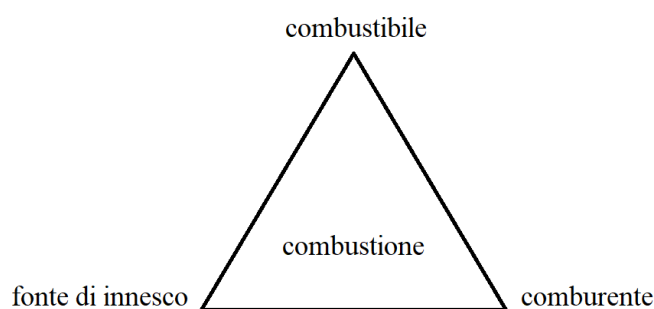
Quei composti che riescono a non infiammarsi alla temperatura limite di 750°C vengono invece classificati come non combustibili.

### 2.1.1 La combustione

Il fenomeno in questione è un processo di ossidazione i cui prodotti sono calore e rilascio di energia luminosa.

Gli elementi necessari per la costruzione del *triangolo del fuoco*, alla base del fenomeno della combustione sono tre:

- combustibile;
- comburente;
- innesco.



**Figura 2.1.** Rappresentazione grafica schematica del triangolo del fuoco

Se viene a mancare anche solo uno di queste tre componenti, non si chiude il cosiddetto *triangolo del fuoco* (Figura 2.1), e la combustione non avviene.

Come già accennato precedentemente esistono però fenomeni, definiti di autoignizione, dove è possibile che si verifica l'autoaccensione dei combustibili solidi, e dove il ruolo dell'innesco lo riveste il gradiente termico del combustibile stesso (viene oltrepassata la temperatura di autoignizione).

Durante la combustione vengono rilasciati composti e particelle, gas combustibili, gas non combustibili, fuliggine, cenere e composti di origine carboniosa: essi sono i prodotti di combustione, la cui formazione è causata dalla reazione che avviene tra l'ossigeno presente nell'aria e il combustibile.

Doveroso è fare una precisazione, distinguendo ora tra fiamma premiscelata e fiamma diffusiva:

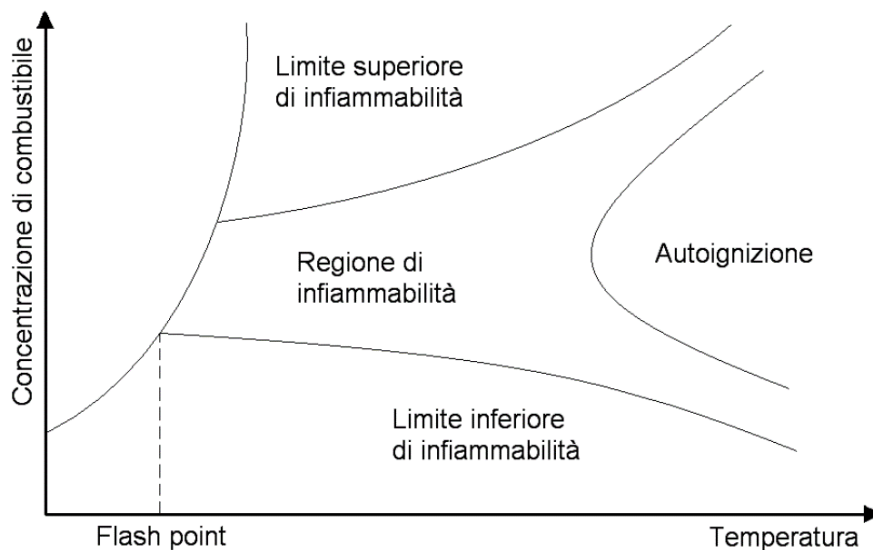
- quello che distingue le fiamme premiscelate è la velocità del fronte di fiamma che, aumentando, consuma l'iniziale miscelazione di aria-combustibile formatasi nelle fasi principali della combustione;
- si parla di fiamme a diffusione quando il combustibile e il comburente si miscelano nella zona di reazione. Quando il rapporto aria/combustibile è vicino al rapporto stechiometrico<sup>1</sup> nascono nuclei di fiamma indipendenti.

La condizione in cui la concentrazione di gas combustibili è compresa nel campo di combustibilità è l'unica affinché si verifichi un incendio di una miscela di gas: la combustione non avviene nel caso in cui manca combustibile (limite inferiore di infiammabilità) o nel caso in cui manca comburente (limite superiore di infiammabilità), come ricordato parlando, all'inizio del paragrafo, del triangolo del fuoco.

Per una visione schematica di quanto appena detto, si riporta la Figura 2.2: si può qui vedere come all'aumentare della temperatura si allunga l'intervallo di infiammabilità.

---

<sup>1</sup> Il rapporto stechiometrico è il rapporto perfetto tra la massa del comburente e del combustibile affinché la combustione sia completa.



*Figura 2.2. Limiti per la combustione*

Si definiscono:

- Flash point: temperatura per la quale un materiale rilascia una mole di aeroformi in grado di generare una miscela infiammabile con l'aria circostante.
- Temperatura di autoignizione: temperatura necessaria affinché un materiale bruci anche senza innesco.

La temperatura è, in altre parole, una condizione alla base della combustione, che consente la reazione tra il combustibile e la miscela comburente.

Nelle reazioni di combustione, viene definito il calore emesso come la liberazione dell'energia potenziale di natura chimica, ovvero la differenza di energia tra i reagenti e i prodotti.

Il calore rilasciato provoca l'innalzamento della temperatura dei reagenti; non sono rari i casi in cui si verifica un aumento della temperatura dei reagenti tale per cui venga rilasciata energia elettromagnetica; nel caso in cui il prodotto combustibile non è in grado di permettere la diffusione di particelle volatili ma prosegue la combustione sotto forma di brace è possibile anche che avvenga una combustione con l'assenza di una manifestazione luminosa (fiamme).

Le condizioni necessarie perché la combustione si verifichi è la presenza di un innesco, o una fonte di calore capace di rilasciare energia (necessariamente superiore all'energia di attivazione del materiale combustibile).

Si definisce il potere calorifico di una sostanza come la quantità di calore che viene rilasciata durante un incendio dalla combustione completa di quella sostanza, a pressione



costante: esso è quindi associabile al calore di combustione moltiplicato per il numero di moli contenute in un kilogrammo (o in un metro cubo) di quella stessa sostanza.

Vengono ora definiti il potere calorifico superiore (P.C.S.) e il potere calorifico inferiore (P.C.I.).

Il potere calorifico inferiore è pari al potere calorifico superiore sottratto del calore di condensazione della fase vapore che si forma durante la combustione.

L'acqua contenuta in un qualsiasi comburente evapora non appena inizia la reazione di combustione assorbendo calore: questo calore sarà energia persa nel caso in cui non si verifica la successiva fase di ricondensazione.

L'unità di misura del potere calorifico è la kcal/kg, o il MJ/kg ( $1 \text{ kcal} = 4186,8 \text{ J}$ ) nel caso di combustibili solidi o liquidi, e la kcal/m<sup>3</sup> nel caso di combustibili gassosi.

Nella Tabella 2.1 vengono forniti i valori di densità di alcuni combustibili più comuni; vengono associati ad essi i valori del potere calorifico inferiore dei combustibili stessi.

**Tabella 2.1:** Valori di densità e di potere calorifico inferiore di alcuni combustibili.

Combustibili	U.M.	Densità	Potere calorifico inferiore	
			<i>kcal/U.M.</i>	<i>MJ/U.M.</i>
Gasolio	<i>litro</i>	0,835	8500	35,58
GPL	<i>litro</i>	0,52	5720	23,94
GPL	<i>kg</i>	1	11000	46,05
GPL	<i>m<sup>3</sup></i>	1,92	21120	88,41
Metano	<i>m<sup>3</sup></i>	0,679	8250	34,53
Legna	<i>kg</i>	1	3700	15,49
Pellet	<i>kg</i>	1	4500	18,84

### 2.1.2 L'incendio

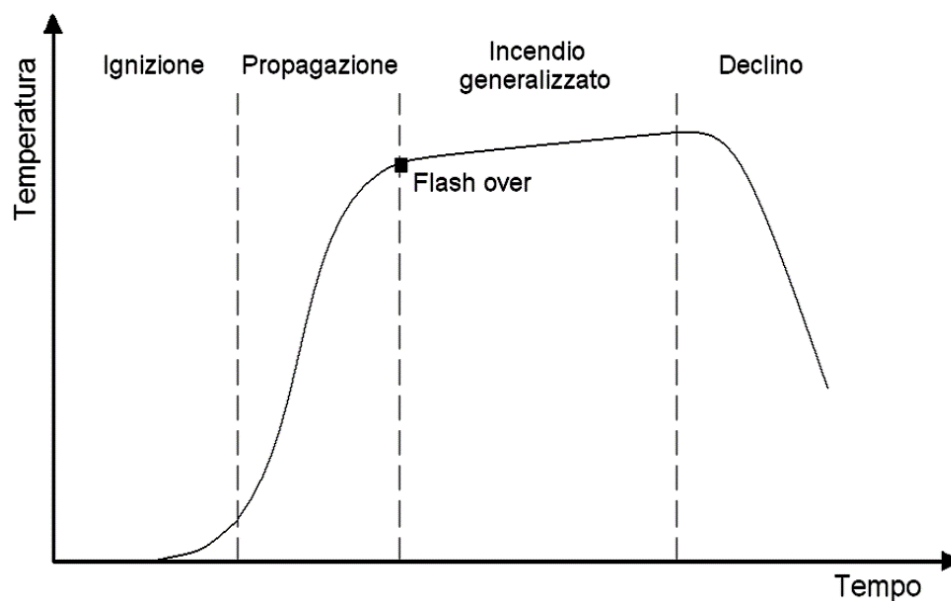
L'incendio si può definire come una qualsiasi combustione incontrollata.

L'incendio è senza dubbio un fenomeno complesso, la cui schematizzazione risulterebbe difficile da rappresentare. La dinamica dell'incendio si può comunque descrivere in quattro fasi caratteristiche:

<i>Ignizione</i>	in questa fase iniziale una fonte di calore aumenta la temperatura del combustibile. La temperatura combustibile, che assume valori sempre più alti, causa la degradazione termica del materiale stesso, rilasciando sostanze gassose infiammabili. Come descritto nel paragrafo §2.1.1, in presenza di innesco e comburente, e nella condizione che ci si trovi entro i limiti di infiammabilità, nasce la combustione. La progressione nel tempo della fase di ignizione è associata a vari fattori (infiammabilità, caratteristiche dell'ambiente circostante, altezza ecc.).
<i>Propagazione</i>	la temperatura aumenta rapidamente; nelle fasi iniziali di ignizione e propagazione dell'incendio le fiamme rimangono circoscritte alla zona interessata inizialmente, e le temperature restano medio basse. In queste fasi iniziali, per avere più possibilità di riuscita e di successo delle operazioni, è consigliato l'intervento al fine di

	<p>limitare i danni. Terminato il processo di sviluppo della reazione di combustione circoscritta ad un punto, il calore irradia le zone attorno, innescando inevitabilmente fenomeni di propagazione delle fiamme e altre reazioni di combustione. Fattori come le reazioni di scambio termico e il rilascio di energia termica influiscono notevolmente sulla propagazione dell'incendio. A seconda del tipo di combustibile coinvolto, del rapporto tra la quantità di combustibile e di comburente, e in base al contesto ambientale in cui si verifica l'incendio, la velocità di propagazione delle fiamme assumerà valori differenti: più la quantità di combustibile e comburente si avvicina ad un valore riconosciuto come rapporto di massa ideale (rapporto stechiometrico) più cresce la velocità di diffusione delle fiamme durante un incendio.</p>
<i>Incendio generalizzato</i>	<p>questa fase dell'incendio prende vita all'istante di raggiungimento del flash over, cioè il punto in corrispondenza del quale si verifica il massimo rilascio del calore. A questo punto vengono coinvolti dalla combustione tutti i materiali e gli oggetti all'interno del compartimento, avendo tutti raggiunto la temperatura di ignizione. In questa fase si registrano le temperature più alte. I fenomeni associati che contraddistinguono gli istanti di incendio generalizzato sono quindi: aumento della temperatura; aumento della velocità di combustione; aumento dell'emissione e della propagazione orizzontale e dall'alto al basso dei gas; accensione spontanea dei prodotti combustibili in prossimità del punto di innesco delle fiamme, e il raggiungimento della temperatura di combustione dei prodotti combustibili più lontani, associato alla relativa produzione di gas infiammabili.</p>
<i>Fase finale dell'incendio</i>	<p>durante questa fase conclusiva si verifica il progressivo consumo del combustibile o del comburente e la temperatura inizia ad assumere valori sempre più bassi, fino a che l'incendio si estingue completamente</p>

Le fasi dell'incendio appena descritte vengono schematizzate nella curva riportata nella Figura 2.3, che riporta, a titolo esemplificativo, l'andamento ideale di propagazione di un incendio di compartimento.



*Figura 2.3. Curva ideale di propagazione di un incendio di compartimento.*

### 2.1.3 Gli interventi di estinzione

Gli interventi di estinzione devono tener conto della composizione del combustibile, della classe di incendio in questione, e del tipo di incendio (incendio di superficie o incendio di volume) cosicché si risolvano mediante l'utilizzo di prodotti estinguenti adatti, che non rischiano di peggiorare la gravità del fenomeno.

Gli incendi definiti di superficie attaccano solo lo strato più esterno del combustibile, interessando in genere solo una parte di limitato spessore.

Utile all'estinzione e ad ostacolare questo tipo di incendio è cercare di ridurre la concentrazione del volume di ossigeno nell'ambiente vicino al focolaio di almeno 15 punti percentuali in volume in atmosfera, mediante l'applicazione nell'aria di gas o altri soffocanti: si cerca in questo senso di ostacolare il mantenimento e la diffusione nel tempo e nello spazio della combustione.

Quando invece sono oggetto del fenomeno della combustione gli strati di massa di combustibile al di sotto dello strato superficiale, si parla di incendi di volume: caratteristiche di questi fenomeni sono la formazione persistente e duratura di braci.

Utile all'estinzione e ad ostacolare questo tipo di incendio è il raggiungimento in atmosfera di una saturazione inertizzante che possa avvolgere il combustibile per un buon periodo, e vantaggioso alle operazioni di estinzione è cercare di portare la temperatura dei materiali al di sotto di quella di accensione.

Possono essere individuate cinque modalità estinguenti a seconda della tipologia di azione dell'intervento:

- *Separazione o soffocamento*: vengono allontanati combustibile e comburente, oppure si cerca di togliere il combustibile dall'ambiente interessato dalla combustione. In questo senso si utilizzano rimedi come schiuma antincendio, teli d'amianto, acqua, pareti divisorie, chiusure di saracinesche, oppure ostruendo lo scarico dai serbatoi dei liquidi infiammabili.
- *Diluizione*: viene diminuita sostanzialmente la concentrazione del combustibile o del comburente, oppure si satura l'atmosfera circostante con combustibile (vengono utilizzati prodotti a base di azoto, anidride carbonica, acqua, idrocarburi alogenati, e vengono chiuse le aspirazioni e le aperture di areazione, ecc.).
- *Disgregazione*: vengono allontanati gli inneschi e viene spezzato il contatto tra combustibile ed inneschi; utile in questo senso risulta essere l'applicazione di reti spostafiamme, getti tagliafiamme, o l'azione meccanica di mezzi estinguenti.
- *Raffreddamento*: si cerca di abbassare la temperatura al di sotto della temperatura di infiammabilità, mediante l'impiego di acqua o sistemi di refrigerazione.
- *Inibizione*: si ostacola la diffusione della reazione chimica di incendio attraverso l'utilizzo di alcune sostanze inibitrici che fanno crescere di fatto l'energia di attivazione (polveri, idrocarburi alogenati).

Considerando ora le classi di incendio elencate al §2.1, è giusto sottolineare come ognuna delle classi descritte preveda un determinato tipo di estinguente.

## 2.2 Scenari di incendio

Prima di trattare il problema dei meccanismi di propagazione degli incendi esterni a danno di edifici civili (§2.2.3), si definisce il concetto di *scenario di incendio*, affrontandolo dal punto di vista teorico, come brevemente raccolto nei paragrafi §2.2.1 e §2.2.2.

### 2.2.1 Generalità e definizione

Con il termine *scenario di incendio* si definisce la “descrizione qualitativa dell’evoluzione di un incendio che individua gli eventi chiave che lo caratterizzano e che lo differenziano dagli altri incendi”<sup>2</sup>.

Definendo lo scenario di incendio è fondamentale riconoscere le seguenti fasi: innesco, crescita dell’incendio, incendio sviluppato completamente, fase finale di decadimento.

Lo scenario di incendio è costituito da una serie di fenomeni associati a fattori differenti, come:

- tipo di incendio;
- condizioni di ventilazione;
- condizioni ambientali esterne;
- prestazione dei sistemi di protezione antincendio;
- tipo, grandezza, posizione della sorgente di incendio.

La moltitudine di tipologie di scenari di incendio che interessano una struttura capaci di svilupparsi in situazioni reali sono innumerevoli: è di assoluta importanza il compito dei professionisti di riconoscere e di identificare quanti più scenari possibili che possano essere ragionevolmente rappresentativi per le situazioni di rischio più significative per l’edificio in esame.

Verrà poi stabilita l’attenzione sugli scenari che tra questi figurano come i più pericolosi e frequenti, definiti *scenari di incendio progettuali*, e che saranno studiati dai professionisti incaricati mediante l’utilizzo di appositi modelli di incendio: attraverso tali

---

<sup>2</sup> definizione contenuta nel D.M. 9 maggio 2007.

modelli verranno analizzati i comportamenti delle strutture quando soggetto all'azione del fuoco.

### **2.2.2 Criteri di scelta degli scenari di incendio**

Saper optare per l'adeguato scenario di incendio relativo ad un edificio è di stretta importanza, e la decisione risulta essere una conseguenza della stima del rischio (R) relativo a ogni possibile scenario di incendio per la costruzione in esame; R risulta essere il prodotto della probabilità di accadimento P moltiplicato per le conseguenze C che lo scenario stesso provocherebbe.

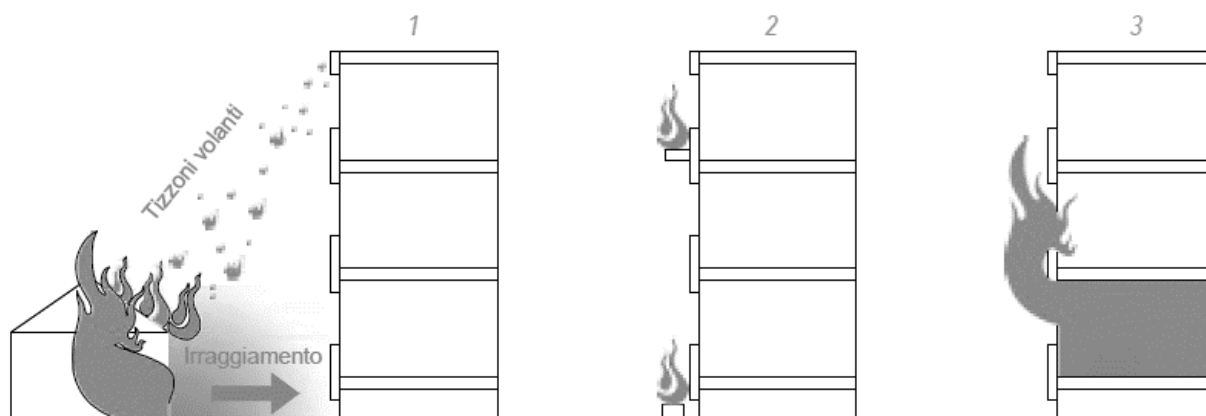
La stima del rischio di incendio è davvero importante in quanto permette di studiare e definire le misure di prevenzione e di protezione passiva da istituire nella pratica per la mitigazione del rischio stesso; di fatto, i metodi più utilizzati, utili per la determinazione degli scenari di incendio di progetto, sono:

- *Fire Risk Assessment (FRA)*: vengono definiti gli scenari di progetto basandosi sulla valutazione diretta del rischio di ciascun scenario di incendio di progetto riconosciuto;
- *Allegato E del EN 1991-1-2*: viene calcolato il carico di incendio di progetto pari al carico di incendio caratteristico moltiplicato con l'uso di appositi coefficienti di probabilità, che tengono conto della presenza di sistemi di protezione attiva che possano incidere sull'andamento della velocità di propagazione delle fiamme.

### **2.2.3 Meccanismi di propagazione dell'incendio sulle facciate**

Negli ultimi anni si è potuto assistere ad un significativo aumento del numero e delle dimensioni degli edifici di grande altezza, fattore per cui la sicurezza antincendio delle facciate riveste oggi un settore di grande importanza e studio.

Tra le cause che di più condizionano gli incendi di facciate è importante ricordare l'incendio di compartimento, che si innesca quindi all'interno dell'edificio (vedi figura 2.4, particolare numero 3).



**Figura 2.4.** Tre scenari tipici di propagazione dell'incendio sulla facciata degli edifici.

Nell'elenco successivo vengono ricordate le vie attraverso le quali è possibile che questo tipo di incendio si propaghi:

- le porte e finestre presenti sulla facciata, vie per mezzo delle quali l'incendio si propaga negli spazi di compartimentazione adiacenti al compartimento interessato a causa dei flussi termici indotti;
- eventuali vuoti o cavità estese in altezza sulla facciata, come nel caso di facciate ventilate o a doppia parete, di cui si ricorda l'esempio catastrofico dell'effetto camino;
- Spazi non protetti a volte presenti tra la parte alta del solaio e la facciata;
- Vuoti spesso presenti tra la parte alta di una parete di compartimentazione antincendio e la facciata.

Altre tipologie di meccanismi che possono portare alla propagazione dell'incendio sulle facciate degli edifici edili sono gli incendi che si sono sviluppati su edifici o oggetti esterni all'edificio, come cassonetti o autoveicoli, nelle immediate vicinanze dell'edificio.

Come si vede dalla figura 2.4, la casistica appena descritta è stata rappresentata:

- nel particolare 1 inscenando la propagazione dell'incendio esterno per irraggiamento dall'edificio contiguo separato;
- nel particolare 2 inscenando la propagazione dell'incendio esterno lungo la facciata combustibile per irraggiamento o per esposizione diretta alle fiamme scaturita da focolai di incendio in prossimità della costruzione stessa.

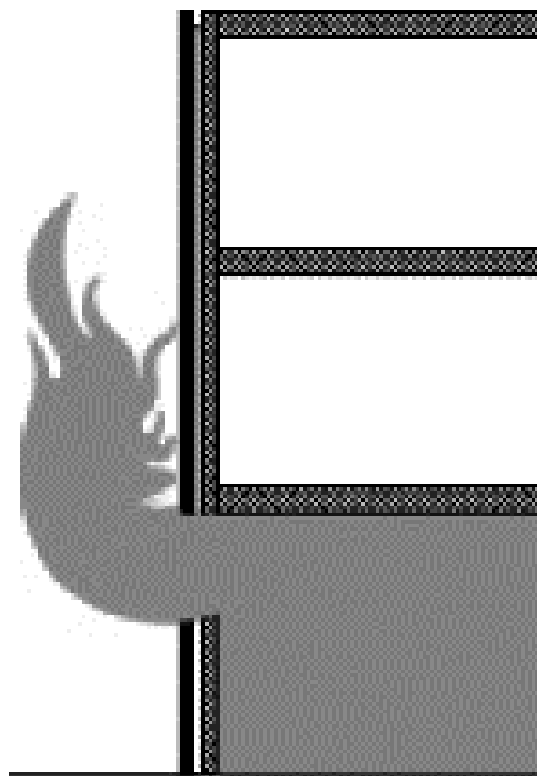
La relativa velocità di crescita delle fiamme che, da focolaio esterno, si propagano attaccando lo strato esterno della facciata dipende dalle caratteristiche proprie del sistema edilizio, in cui protagonisti sono i seguenti fattori:



- reazione al fuoco del materiale con cui è stata realizzata la facciata che influisce sulla velocità di propagazione dell'incendio;
- esistenza di cavità all'interno della facciata, che costituiscono parte del sistema di facciata (come ad esempio del sistema di facciate ventilate), oppure le cavità che si formano facciata durante l'incendio.

Nel caso in cui le fiamme giungono nel vuoto creatosi, essendo lo spazio lungo e stretto, avviene l'aumento significativo in altezza delle fiamme stesse (effetto camino), a prescindere dalle proprietà del materiale isolante.

La situazione appena descritta andrà ad aggravarsi nel caso in cui non vengano rispettate le prefissate distanze di separazione o non siano presenti barriere antincendio: verrà ad inscenarsi una situazione per cui si verifica una rapida propagazione verticale dell'incendio sotto lo strato esterno di finitura della facciata, come mostrato in Figura 2.5.



*Figura 2.5. Propagazione dell'incendio attraverso il corridoio d'aria nella facciata*

- esistenza di finestre e porte e di qualsiasi altro tipo di aperture sulla facciata che possa consentire il rientro delle fiamme all'interno dell'edificio, e quindi la loro propagazione da un piano all'altro, secondo il meccanismo che verrà descritto più avanti al §2.2.3.1.

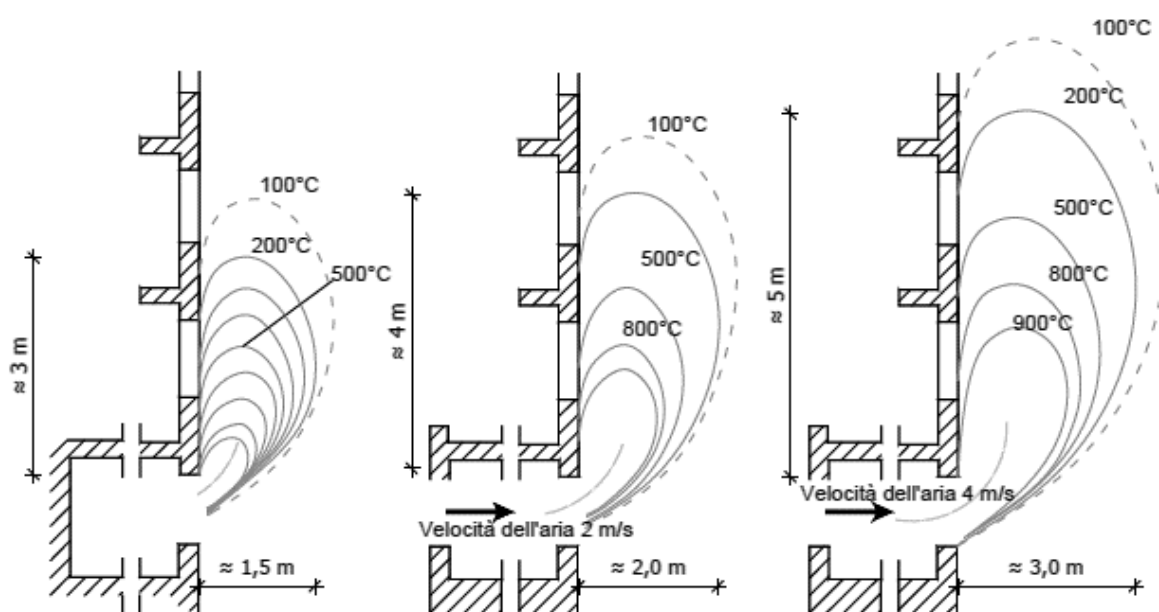
Un fattore fondamentale per la valutazione e la determinazione del rischio è la stima dell'altezza di fiamma (di cui al §2.2.3.1) che fuoriesce dalle aperture in caso di incendio, e la definizione del flusso termico irradia la facciata.

Il flusso termico è una caratteristica grandezza che riveste un'importanza rilevante come contributo a incendi sviluppati all'interno all'edificio, quando cioè si verifica una propagazione di flussi termici di ingente modulo lungo lo sviluppo verticale esterno.

### 2.2.3.1 L'altezza di fiamma

Una volta raggiunta e superata la fase di Flashover all'interno di un qualsiasi compartimento di struttura, le fiamme fuoriescono da porte e finestre, causando la rottura delle superfici vetrate e diffondendosi sulla facciata: si verifica una propagazione del fuoco nell'ambiente esterno.

Le fiamme che fuoriescono toccano altezze che possono arrivare fino a 5 m dalla base dell'apertura, prescindendo dal tipo di facciata e dal tipo di materiale di cui la stessa è costituita: ciò che maggiormente influenza l'altezza di fiamma è la velocità di circolazione dell'aria (Figura 2.6), la quantità e natura del combustibile stazionata nel compartimento e le dimensioni dell'apertura.



*Figura 2.6. Altezze di fiamma con le relative temperature sulla facciata a seconda della velocità di circolazione dell'aria.*

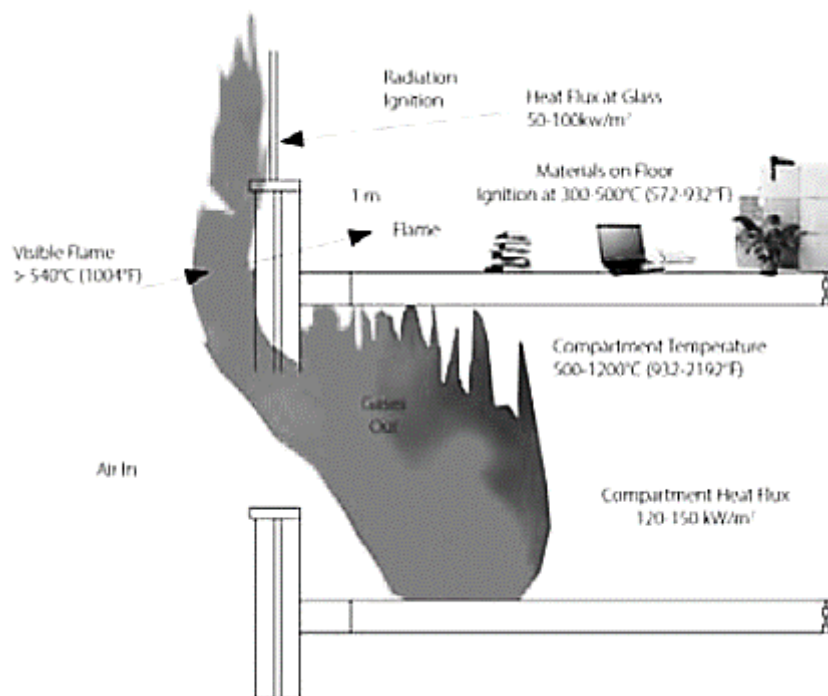
Viene così inscenato il fenomeno che viene generalizzato a *incendio a ventilazione controllata*: si verifica la librazione dei gas caldi dalla parte più alta delle aperture, a seguito della rottura delle superfici trasparenti indotta dalle alte temperature e dalle fiamme; si tratta di un incendio dipendente dalla ventilazione: una volta terminato il quantitativo di aria nel compartimento ed essendo presente una parte di gas caldi non

ancora stati capaci di bruciare all'interno della stanza, si verifica la fuoriuscita dei gas all'esterno, e sono in quel momento la parte non bruciata può incontrare l'aria generando la combustione dei gas all'esterno dell'edificio.

Il risultato è una fiamma capace di propagarsi verso l'alto lungo la facciata esterna.

Esaminando gli incendi che hanno origine all'interno dell'edificio, sono distinguibili 3 principali fasi (Figura 2.7) che portano alla propagazione finale:

- Durante la prima fase le fiamme e i gas presenti nel compartimento della struttura aggrediscono le pareti e gli oggetti presenti nella compartimentazione, comprese le protezioni antincendio;
- Nella seconda fase le fiamme e i gas caldi sono liberi di uscire dalle aperture che sono state frantumate dalle alte temperature, e vengono arrecati danni da combustione alla superficie esterna della facciata;
- Nella terza fase le fiamme irradiano le superfici trasparenti ai piani superiori: ciò causa la diffusione dell'incendio e la nascita di nuovi focolai per irraggiamento all'interno di altri compartimenti della costruzione.



**Figura 2.7.** Fenomeno di propagazione delle fiamme, con rottura della superficie vetrata

Nel caso di incendio libero l'altezza di fiamma è commisurata alla quantità di moto del flusso di combustibile e alla presenza in aria dei gas.

Per poter valutare il fenomeno occorre introdurre il Numero di Froude, utile all'esaminazione delle problematiche che la diffusione del fuoco ai piani superiori di un edificio può comportare:

$$Fr = \frac{u^2}{g \cdot D} \quad (2.1)$$

dove  $u$  (m/s) è la velocità del flusso,  $D$  (m) è il diametro della sorgente e  $g$  rappresenta l'accelerazione di gravità.

È possibile poi riformulare quanto appena presentato nella (2.1), e vedere il numero Fr come:

$$u = \frac{m_f}{\rho_{\infty} \cdot D^2} \quad (2.2)$$

Dove  $\rho_{\infty}$  (kg/m<sup>3</sup>) è la densità dell'aria e  $m_f$  (kg/s) è il flusso di massa nelle fiamme, cioè:

$$m_f = \frac{Q}{c_p \cdot T_{\infty}} \quad (2.3)$$

Con  $c_p$  (kJ/kg·K) calore specifico dell'aria,  $T_{\infty}$  (K) la sua temperatura, e  $Q$  (KW) tasso di rilascio di calore.

Si può quindi riscrivere la (2.1) come:

$$Fr = \frac{Q^2}{(\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T_{\infty} \cdot D^2)^2 \cdot g \cdot D} \quad (2.4)$$

A questo punto è importante una considerazione: la radice del numero Fr è uguale al tasso  $Q^*$ :

$$Q^* = \sqrt{Fr} = \frac{Q}{\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T_{\infty} \cdot D^2 \cdot \sqrt{g \cdot D}} \quad (2.5)$$

È possibile riconoscere una interazione tra il valore di altezza di fiamma e il tasso di rilascio termico, che in forma adimensionale tra altezza  $Z_f$  e il diametro  $D$  si tradurrà con l'equazione (2.6)

$$\frac{Z_f}{D} = f(Q^*) \quad (2.6)$$

L'equazione (2.7), trascritta a seguito, rappresenta la relazione tra l'altezza media e energia prodotta nel caso di incendio libero all'aperto; questo standard viene utilizzato per la verifica e il calcolo di incendi esterni localizzati vicino alla struttura vittima dell'incendio:

$$Z_f = 0.235 \cdot Q^{2/5} - 1.02 \cdot D \quad (2.7)$$

In sintesi, vengono ora proposti gli studi condotti al fine di indagare le caratteristiche dell'altezza di fiamma in seguito a fenomeni di combustione che si innescano all'interno degli edifici e che fuoriescono per via di finestre.

Nei primi anni del 1960, misero a punto i primi studi sull'altezza di fiamma di un incendio che fuoriesce dalle aperture di un compartimento.

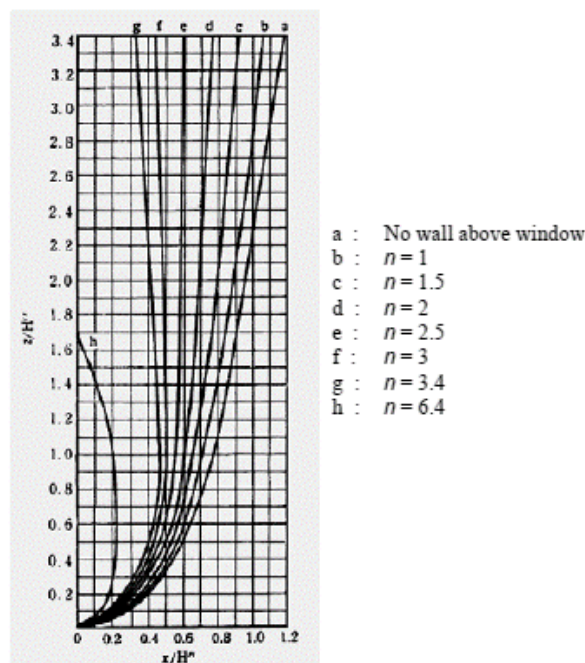
L'altezza delle fiamme era vista come quella ad una temperatura di 500°C, ed era formulata, in particolare, in relazione al rapporto di forma  $n$ , cioè al rapporto espresso nella (2.8):

$$n = \frac{2+w}{h} \quad (2.8)$$

Con  $h$  altezza e  $w$  larghezza della finestra.

Ciò che la (2.8) volle introdurre fu applicabile nello specifico per finestre la cui larghezza relativamente ampie rispetto alla loro altezza: in questa casistica, i gas caldi che fuoriescono assumono la tendenza a tornare indietro e a riattaccarsi alla facciata dell'edificio.

Questo fenomeno è ben espresso nella Figura 2.8, dove viene riportato il grafico dove vengono definiti i risultati delle prove esposti in forma adimensionale:



**Figura 2.8.** Traiettorie dei gas caldi al variare del rapporto di forma

A differenza di ciò che si verifica nel caso di finestrate caratterizzate da una vasta area vetrata, per aperture strette, e quindi per valori bassi di  $n$ , si verifica il fenomeno per cui le fiamme dell'incendio si sviluppano lontano dalla apertura prima che la loro conformazione di figura si disponga verticalmente come quanto visto finora: la causa di questo comportamento è da indagare negli effetti dovuti alla leggerezza dei gas.

Questo comportamento, nel caso di fuoriuscita di fiamme da finestre di dimensione piuttosto contenuta, è assimilabile al comportamento delle fiamme in assenza di parete al di sopra dell'apertura: l'effetto della parete posizionata al di sopra delle aperture diviene quindi meno importante, mentre di fatto aumenta la tendenza alla predisposizione orizzontale delle fiamme.

Formulando la relazione per l'altezza di fiamma proiettata da una apertura di un vano, si riporta la (2.9):

$$z + h = 18.6 * \left(\frac{R}{w}\right)^{2/3} \quad (2.9)$$

Dove  $R$  (kg/s) rappresenta la velocità di combustione; in questo caso l'altezza  $z$  della fiamma è misurata a partire dalla parte superiore dell'apertura.

Tale stima dell'altezza di fiamma risulta essere piuttosto sovrastimata, e nel 1978 la stessa relazione (2.9) venne meglio riformulata (2.10), anche in relazione ai risultati sperimentali prima ottenuti; questa è la formula impiegata nell'ingegneria antincendio:

$$z + h = 12.8 * \left(\frac{R}{w}\right)^{2/3} \quad (2.10)$$

Negli ultimi anni è stato presentato un criterio innovativo per analizzare le quote di propagazione lungo le facciate, basato su studi inscenati su fenomeni di combustione in post-flashover a ventilazione costante.

Il dato che racchiude le conclusioni più importanti di questa ricerca sta nel fatto che le fiamme fuoriescono da una finestra o da una porta durante un incendio, per attaccare successivamente la facciata esterna di un edificio, quando  $Q^* > (1500 * A \sqrt{h})$  (= *valore critico*): l'altezza media è calcolata in relazione alla potenza termica del materiale che prosegue la reazione di combustione all'esterno dell'edificio e alla geometria della stessa porta o finestra della stanza.

$$\frac{z_f}{l_1} = f(Q^*_{ex}) = f\left(\frac{Q_{ex}}{\rho_{00} * c_p * T_{00} * l_1^{5/2} * \sqrt{g}}\right) \quad (2.11)$$

# Capitolo 3

## Il comportamento al fuoco dei materiali usati in edilizia civile

In questo capitolo, dopo un'introduzione generale sul comportamento alle alte temperature dei principali materiali da costruzione, si analizzano nello specifico i quattro materiali più usati, quali calcestruzzo (§3.1.1), acciaio (§3.1.2), calcestruzzo armato (§3.1.3) e laterizio (§3.1.4), e infine si elencano i principali materiali utilizzati per la riqualificazione antincendio delle strutture di civili costruzioni, descrivendone le qualità ignifughe.

Il più gran contributo alla stesura di questo paragrafo è stato dato dalle pubblicazioni di M. Collepari sulle strutture in calcestruzzo armato, citato nella bibliografia di tesi.

### 3.1 Effetti delle alte temperature sui materiali da costruzione

È stata precedentemente trattata la definizione di reazione al fuoco di un materiale (Capitolo §2), indicata come l'attitudine di tutti i materiali soggetti a un incendio che rivestono un ruolo contributivo all'alimentazione e alla propagazione dell'incendio stesso.

L'attitudine dei prodotti da costruzione appena descritta dipende da alcuni parametri fondamentali di caratterizzazione; alcuni di essi sono stati già definiti all'interno del Capitolo §2, ma si vuole riportare qui, affianco all'elenco, una breve descrizione di ciascuno:

In base alle caratteristiche del prodotto appena espresse, i materiali da costruzione possono essere classificati come infiammabili, difficilmente infiammabili e incombustibili.

A questo punto è doveroso ricordare che molti prodotti usati nelle costruzioni edili definiti come incombustibili sono però poco resistenti al fuoco: essi, infatti, pur non partecipando al fenomeno di combustione, rischiano di perdere molte delle loro caratteristiche a causa delle alte temperature: un esempio tra tutti è l'acciaio (§3.1.2), in grado di rompersi e flettersi sotto l'azione del calore.

Normalmente in incendi reali che avvengono in costruzioni edili vengono raggiunte temperature dell'ordine delle migliaia di gradi: soggetti a tali gradienti termici, sono pochi i materiali che riescono a preservare la loro resistenza strutturale.

Nella fase di progettazione degli edifici si ricorre spesso a una scelta di materiali guidata dall'esigenza di riuscire ad assicurare un equilibrio fra azione stimolatrice e tensione propria, consci del fatto che qualunque tipo di fenomeno non previsto sarà in grado di sconvolgere questo equilibrio.

A causa delle alte temperature raggiunte durante gli incendi, i prodotti da costruzione soggetti a questi fenomeni sono oggetto di sollecitazioni termiche in grado di falsare la resistenza meccanica delle strutture, a causa del calore.

Come è chiaro immaginare e come ampiamente detto finora, ogni elemento costruttivo è caratterizzato da un comportamento differente durante l'esposizione alle alte temperature.

Si ritiene opportuno, dopo questa digressione sulla generalità del comportamento al fuoco dei materiali, introdurre alle principali caratteristiche dei materiali maggiormente usati nelle costruzioni.

### **3.1.1 Il calcestruzzo**

Per poter ben definire gli effetti dell'azione delle fiamme ai danni delle strutture in calcestruzzo bisogna cominciare ad esaminare i cambiamenti che l'induzione di un alto gradiente termico sono in grado di provocare nelle componenti del materiale.



In questo paragrafo verranno affrontati, in particolare, gli effetti che un incendio potrebbe determinare negli elementi di cui il calcestruzzo è composto, quali pasta cementizia, inerti e acqua.

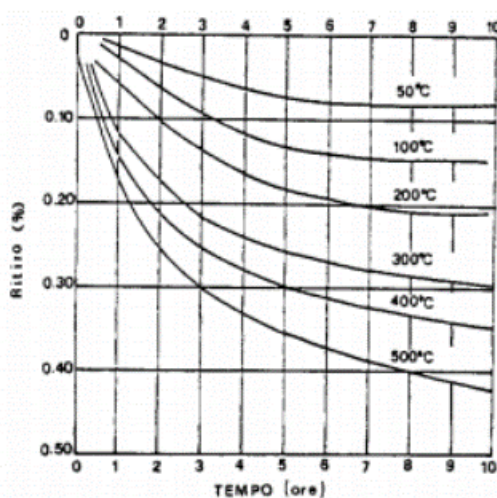
Il comportamento delle proprietà meccaniche del materiale quando esposto ad alte temperature, infatti, è determinabile da un'analisi preliminare sulle sue componenti.

Si riporta la definizione di calcestruzzo data dall'opera di M. Collepari "Effetto delle alte temperature sulle proprietà dei c.a.": "La pasta di cemento è costituita da particelle di gel idrosilicatico (pori di gel) di natura porosa e di particelle cristalline (idrossido e carbonato di calcio, alluminati idrati) fra le quali sono disseminati i pori capillari".

I pori di cui parla la definizione soprariportata sono pieni d'acqua, ed è chiaro che, con il progressivo crescere del calore indotto, l'acqua al loro interno venga condizionata a fuoriuscirvi: questo fenomeno è la causa principale della deformazione volumetrica e del ritiro volumetrico dei prodotti in calcestruzzo.

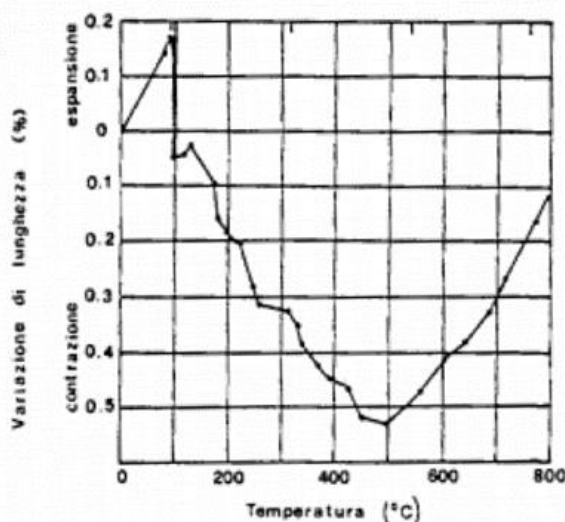
In Figura 3.1 viene proposto il grafico che elabora l'effetto del riscaldamento sulla degradazione volumetrica del calcestruzzo, in funzione del tempo, cosicché si possa ancor meglio percepire la misura con cui l'azione termica influisce sul fenomeno di ritiro.

Da come si può dedurre esaminando tale grafico, al crescere della temperatura e col passare del tempo di esposizione, il ritiro aumenta esponenzialmente. Dalla letteratura e osservando il comportamento del calcestruzzo si nota come, a partire da temperature piuttosto alte (120° C), la pasta cementizia si disidrata accrescendo la degenerazione del fenomeno di ritiro.



**Figura 3.1.** Ritiro di una pasta di cemento esposta ad alte temperature; immagine tratta da "Effetto delle alte temperature sulle proprietà dei c.a.", Collepari e Valente

In Figura 3.2 si può osservare il progressivo aumento di volume del composito riscaldato fino ai 100°C. La fase di espansione è causata dal fatto che la l'espansione di volume indotta dalle alte temperature è più ingente del ritiro causato dall'evaporazione dell'acqua.



*Figura 3.2. Cambi volumetrici di una pasta cementizia; immagine tratta da "Effetto delle alte temperature sulle proprietà dei c.a.", Collepari e Valente*

Aumentando l'apporto di calore e oltrepassata la temperatura di 100°C, è possibile osservare la sensibile fase di diminuzione di volume causata dalla decomposizione termica dei composti a base d'acqua.

Raggiunti i 500°C di temperatura si manifesta sul provino un altro processo di espansione volumetrica dovuto al fatto che la carbonatazione<sup>3</sup> non ha avuto luogo. Nel caso in cui la fase di carbonatazione fosse continuata si sarebbe potuto assistere al proseguo della fase di riduzione di volume.

La differenza che esiste tra i diversi valori dei coefficienti termici (relativi alla pasta di cemento e dei rispettivi inerti) permette la creazione di tensioni superficiali sulla pasta cementizia, indotte dall'apporto continuo di calore: questo fenomeno causa la contrazione della pasta e l'espansione volumetrica dell'aggregato, con la successiva divisione tra pasta di cemento e l'aggregato e la formazione di spaccature e crepe.

Ciò determina gravi perdite di proprietà meccaniche intrinseche, variazioni volumetriche del calcestruzzo e conseguente riduzione della conducibilità termica: più viene apportato

<sup>3</sup> (da definizione di carbonatazione tratta da Treccani 2015 "La carbonatazione è processo chimico, naturale o artificiale, per cui una sostanza, in presenza di anidride carbonica, dà luogo alla formazione di carbonati").

calore al provino più esso perde di conducibilità, a causa dalla formazione di pori vuoti durante la fase di riscaldamento.

La traduzione nel campo dell'interesse ingegneristico di quanto appena detto è che, durante un fenomeno di incendio in situazioni reali, le spaccature createsi e il distacco di parti di materiale dalla struttura sottoposta a variazioni volumetriche, possono gravare sul comportamento termico della stessa, andando a costituire canali preferenziali attraverso cui si propaga il flusso termico all'interno della struttura, ed in particolare verso le armature; nasce qui un paradosso: mentre all'aumentare della temperatura, la pasta di cemento diventa sostanzialmente più isolante, le spaccature fisiche provocate da questo aumento destabilizzano il sistema strutturale.

Il fenomeno di propagazione del flusso termico attraverso i ferri è favorito dalla loro forte conducibilità di calore, materiale conduttore di calore che quando riscaldato si dilata.

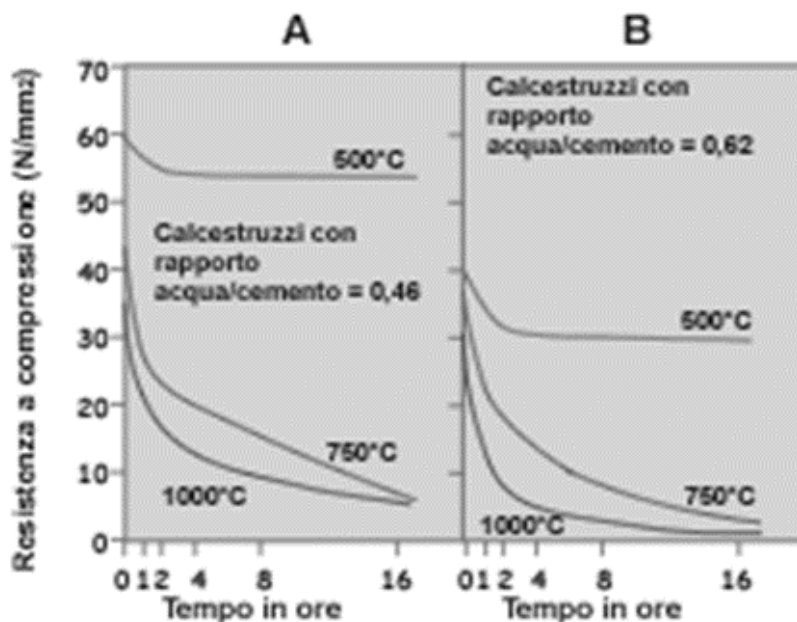
Il pericolo più grave in queste situazioni è lo sfilamento dei ferri delle armature e la caduta di parti del copriferro: la manifestazione di quanto appena detto si verifica quando l'aderenza tra le componenti di ferro e quelle composte da pasta cementizia non è più sufficiente a limitare le spinte che nascono dalla loro diversa espansione volumetrica indotta dalle alte temperature.

Riassumendo, la resistenza al fuoco del calcestruzzo dipende quindi dalla sua composizione (rapporto acqua/cemento, tipo e quantità di inerte, tipo di cemento), dalla compattezza e dall'omogeneità della sua composizione, e dai carichi gravanti sul materiale durante la fase di aumento delle temperature.

Verranno ora analizzate brevemente le variabili che influiscono sulla diversa composizione del calcestruzzo, come il rapporto tra acqua e cemento nella sua pasta cementizia (§3.1.1.1) e la composizione dell'aggregato (§3.1.1.2), la lavorabilità e la posa in opera del calcestruzzo (§3.1.1.3), e di come questi influiscano sulle prestazioni antincendio dello stesso.

#### 3.1.1.1 Il rapporto acqua/cemento

Per capire come questo rapporto possa influire sulle prestazioni del calcestruzzo, viene riportato in Figura 3.3 il confronto fra due campioni di calcestruzzo, entrambi realizzati con lo stesso tipo di aggregato ma aventi rapporti tra acqua e cemento differenti, su cui sono stati applicati riscaldamenti fino a 500-750-1000°C.



*Figura 3.3. Effetto della durata del trattamento termico sulla resistenza meccanica di calcestruzzi con inerti silicei, di pari lavorabilità e diverso rapporto a/c per la presenza (A), o meno (B) di un additivo riduttore di acqua*

Il fenomeno che si registra a 500°C è lo stesso sia per il campione A che per il campione B: il primo e unico calo di resistenza di entrambi i campioni (10 punti percentuali in meno rispetto alle condizioni iniziali) si verifica trascorse 2 ore circa dall'inizio dell'esposizione.

Dopo di che la situazione si stabilizza fino alla fine del test.

Un'importante riduzione della proprietà meccanica dei campioni ha luogo durante i condizionamenti termici a più importanti.

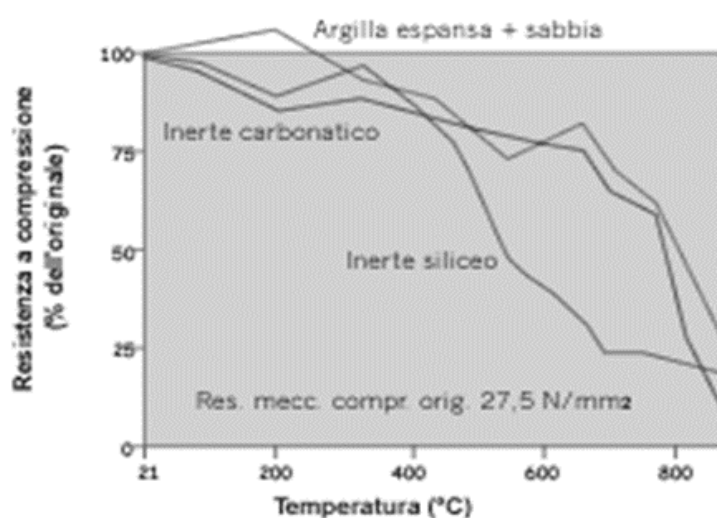
Il rapporto tra contenuto di acqua e quantità di pasta riveste un'importante posizione in questo senso: nel calcestruzzo A è presente un riduttore di acqua; dopo circa mezz'ora di soggezione al calore la resistenza meccanica di questo provino è vantaggiosa rispetto a quella misurata nel provino B, privo di riduttore, che risulta avere quindi un rapporto maggiore tra contenuto di acqua e quantità di pasta.

La conclusione a cui si può giungere è che maggiore è il rapporto tra contenuto di acqua e quantità di cemento all'interno di un sistema in calcestruzzo, minore è la resistenza meccanica che esso mantiene in caso di esposizione ad alte temperature.

### 3.1.1.2 La natura dell'aggregato

Per definizione gli aggregati sono materiali caratterizzati da una granulometria piuttosto piccola (elementi lapidei naturali o artificiali) che vengono utilizzati e impastati con acqua per la creazione della pasta cementizia.

Gli inerti costituiscono lo scheletro del calcestruzzo, nonché la più grossa percentuale della composizione della pasta cementizia, e la loro funzione è quella di assicurare le caratteristiche meccaniche dell'elemento, ridurre calore di idratazione, ridurre i costi della pasta e limitare il fenomeno di ritiro, descritto poco fa, avendo essi un elevato modulo elastico. Alle alte temperature, l'aggregato incide sul comportamento del calcestruzzo, ed in particolare la sua resistenza meccanica. In Figura 3.4 viene descritta la resistenza a compressione durante l'esposizione al calore.



**Figura 3.4.** Andamento della resistenza meccanica del calcestruzzo carbonatico, leggero e calcareo, quando esposto a calore.

Da quel che si deduce dalla Figura 3.4, si può affermare che il tipo di calcestruzzo che garantisce una maggiore resistenza al fuoco è rappresentato dai calcestruzzi a base di inerti di origine carbonatica, in quanto non si verificano in essi diminuzioni di resistenza meccanica.

Questo tipo di calcestruzzi, come quelli a base di argilla espansa e sabbia, raggiunti i 750°C perdono pochi punti percentuali di resistenza a compressione rispetto a quella iniziale, mentre i calcestruzzi a base di inerti silicei registrano un calo di resistenza di quasi 3 volte maggiore rispetto a quelli calcarei.

### 3.1.1.3 La resa finale del calcestruzzo

In questo paragrafo verranno descritti i due fattori che determinano la resa finale del calcestruzzo.

Le conclusioni che si possono trarre analizzando le prove sperimentali organizzate per calcestruzzi a freddo mostrano come quelli poco compatti perdano molte delle loro proprietà e delle loro prestazioni.

Nel caso in cui il materiale risulti avere una scarsa omogeneità, quel che si viene a verificare è la diversificazione della propagazione del calore all'interno del materiale stesso, che si traduce in un differente valore di espansione volumetrica indotta dalle alte temperature.

Se un calcestruzzo viene confezionato pur avendo una cattiva compattazione, la densità all'interno del materiale non risulterà costante, generando fenomeni per cui sarà possibile riscontrare punti con più alta densità di agglomerati, oppure punti dove persiste la presenza di cavità d'aria o d'acqua fra gli inerti.

Quest'ultima conformazione risulterebbe particolarmente pericolosa nel caso di calcestruzzi armati a causa del fenomeno di propagazione del calore all'interno del sistema attraverso la diffusione lungo i ferri, fenomeno descritto al paragrafo precedente: in seguito al cedimento delle armature la struttura potrebbe subire collassi.

Fondamentale per la sicurezza degli edifici risulta quindi il confezionamento di calcestruzzi ben compattati ed omogenei.

Per ottenere tale resa è fondamentale una miscela calcestruzzo caratterizzata da un elevato rapporto acqua/cemento, ma ciò comprometterebbe le caratteristiche meccaniche di compressione della pasta cementizia (vedi punto §3.1.1.1).

Il problema a cui si arriva cercando di ottenere tutti e due i fattori è ben rappresentato dal fenomeno per cui, togliendo l'apporto d'acqua, diminuisce anche la resa finale del calcestruzzo.

Per cercare di far fronte a questa problematica si può procedere secondo 2 operazioni: il primo modo operativo è quello di fissare la quantità tra acqua e cemento affinché siano assicurate certe proprietà, e per pareggiare eventuali mancanze si realizza un opportuno sistema di messa in opera; il secondo modo che potrebbe risultare conveniente è quello di prevedere un sistema in opera e, consecutivamente, stimare a posteriori l'opportuna quantità percentuale del contenuto di acqua.

### 3.1.2 L'acciaio

L'acciaio è per definizione, composizione e realizzazione un prodotto molto più facile del calcestruzzo, grazie anche ai molti test che vengono fatti quando lo si fabbrica, e grazie alla bassa presenza di fattori che possano in qualche modo influenzarlo.

Questo permette di poter condurre studi più approfonditi su questo materiale, e di stimarne, con buona accuratezza, la risposta alla sollecitazione termica, che, dalla letteratura a riguardo, si sa essere dipendente dalla propria resistenza alla trazione e allo snervamento.

Per poter meglio capire il comportamento alle alte temperature dell'acciaio vengono proposte i diagrammi nelle Figure 3.5 e 3.6, dove viene espresso il comportamento sperimentale del legame tensione-deformazione ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) di un campione di acciaio al crescere dell'apporto di calore.

Nel diagramma di Figura 3.5 si può vedere che l'andamento del legame  $\sigma$ - $\varepsilon$  descrive una curva parabolica al crescere della temperatura. Al contrario, più aumenta la temperatura, minori valori assume la tensione di snervamento.

Quest'ultima risente però dell'aumento di deformazione, ed ecco che si può osservare come, per deformazioni pari al 2%, la tensione di snervamento se minori di 400°C è identica a quella che si registra in condizioni di temperatura ambiente.

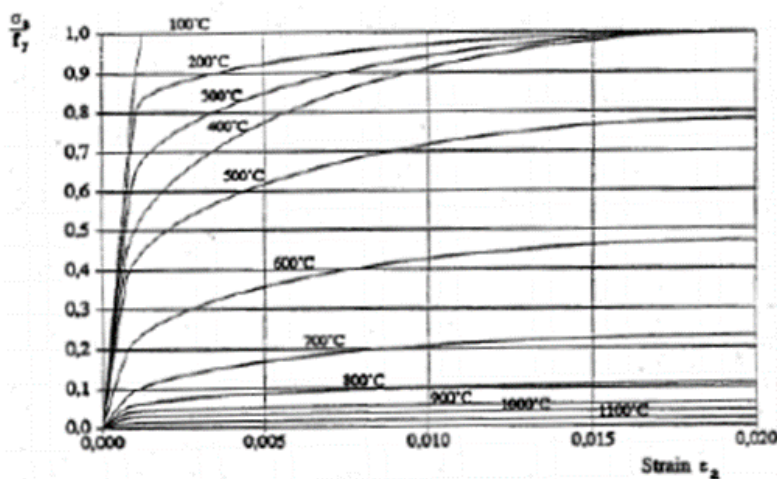
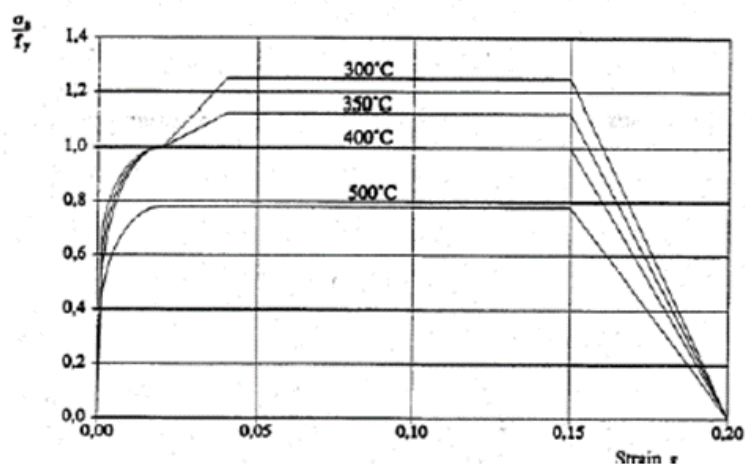


Figura 3.5. Evoluzione del legame  $\sigma$ - $\varepsilon$  dell'acciaio, per deformazioni comprese fra 0-2%, all'aumentare della temperatura



**Figura 3.6.** Evoluzione del legame  $\sigma$ - $\epsilon$  dell'acciaio, per deformazioni comprese fra 0-20%, all'aumentare della temperatura

Nel diagramma riportato in Figura 3.6, raffiguranti il campo delle deformazioni superiori comunque al due per cento, si può dedurre che si verificano condizioni per le quali vengono registrati incrementi della “tensione di snervamento” per  $T < 400^\circ\text{C}$ .

La conclusione a cui si può giungere è che per ogni  $T$  il campione di acciaio può registrare la massima tensione per deformazioni  $>$  al due per cento.

Questo comportamento risulta essere impossibile da accettare per il disegno degli edifici civili e industriali a freddo, ma può essere accettabile per la verifica a caldo della capacità portante di una struttura.

### 3.1.3 Il calcestruzzo armato

Il cemento armato ha una resistenza al fuoco migliore di altri prodotti usati per la realizzazione di strutture edili.

Come già definito al §3.3.1 la resistenza alle alte temperature del calcestruzzo armato dipende dal tipo di aggregato.

Nelle strutture realizzate in calcestruzzo armato, le parti in acciaio e le armature risultano ciò che maggiormente determina il comportamento dell'intero sistema. Passate certe temperature, il calcestruzzo armato perde molte delle proprie caratteristiche meccaniche: essendo l'armatura un conduttore di calore, essa porta all'inevitabile incremento della temperatura differenziale, che potrebbe riflettersi in conseguenze catastrofiche: i fenomeni che possono nascere dal verificarsi di situazioni di questo tipo sono il cedimento del cemento, il successivo sgretolamento delle parti in aggregato e distacco dei ferri, fino a giungere al conclusivo crollo dell'elemento.



In precedenza sono stati discussi i fenomeni causati dai forti gradienti termici sui ferri e sulla pasta.

Un'altra soluzione potrebbe essere l'applicazione di una pannellatura sulla superficie esterna della struttura in oggetto: questa tipologia è sicuramente l'unico applicabile in caso di strutture già esistenti se non sono state previste alcune misure di protezione dei ferri, soprattutto in caso di incendio.

### 3.1.3.1 Il copriferro

Il limite di spessore del copriferro affinché venga garantita la stabilità e la protezione dell'acciaio nel calcestruzzo risulta essere compreso tra 25 e 40 mm.

Il copriferro è come detto un elemento in grado di preservare l'integrità delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio di armatura, rappresentando di fatto uno degli elementi strutturali più importanti per impedire il loro degrado; i compiti per i quali il copriferro è destinato sono:

- Difendere i ferri dagli agenti dannosi;
- preservare l'attaccamento tra i ferri e l'aggregato;
- Difendere i ferri dall'incendio.

In ogni caso, la caratteristica imprescindibile che si vuole ottenere dal confezionamento di un buon copriferro è che esso sia costituito da materiale duro e uguale, così da resistere ai forti gradienti termici e affinché sia garantita la salvaguardia delle armature.

Viene di seguito proposta la Tabella 3.1 al fine di sintetizzare il comportamento generale dei copriferri al raggiungimento di una T esemplificativa (distinti tra quelli composti con un calcestruzzo a base di inerte calcareo o siliceo).

**Tabella 3.1.** Tempo in minuti impiegato dall'acciaio per raggiungere una  $T$  a seconda del copriferro

Spessore del copriferro	Tempo in minuti impiegato dall'acciaio per raggiungere 500°C	
	Inerte calcareo	Inerte siliceo
2	70	50
3	11	80
4	160	120
5	240	180

Le pressioni nel calcestruzzo possono raggiungere valori superiori alla resistenza a trazione del materiale stesso, e causano scoppi e distacchi di aggregato; questo fenomeno è ricordato nella letteratura con il nome di spalling.

Una soluzione per evitare l'accadimento dello spalling può essere l'introduzione nell'impasto di piccole dosi di particelle di plastica, caratterizzate da un livello di fusione piuttosto limitato, che, degradandosi a causa del calore, riescono produrre una finta porosità grazie alla quale è poi possibile abbassare la pressione all'interno dell'elemento, convogliandolo verso l'esterno la pressione.

Utile per garantire una adeguata protezione dell'acciaio di armatura in caso di incendio può essere l'applicazione di uno strato di intonaco di gesso all'estradosso dell'elemento, che, grazie al valore di dilatazione termica contenuto, riduce la possibilità di creazioni di spaccature, attraverso le quali i fumi caldi potrebbero venire in contatto con l'acciaio e danneggiarlo.

### 3.1.3.2 Il calcestruzzo precompresso

Le strutture in calcestruzzo precompresso sono molto sensibili all'azione delle alte temperature, che generalmente inducono moltissime negatività sulla sua resistenza e sugli elementi principali del materiale.

In caso di incendio, infatti, i tiranti di ferro di un elemento precompresso esposto alle alte temperature corrono un alto rischio di perdere di tensione.

Se il limite elastico dell'acciaio si riduce a un valore inferiore a quello della precompressione persistente durante la compressione, si avrà una riduzione della precompressione.

### **3.1.4 Il laterizio**

Le strutture in laterizio, se di tipo omogeneo e ben cotto, resistono molto bene alle sollecitazioni termiche e alle alte temperature, ciò grazie al fatto che durante la loro fabbricazione i mattoni in laterizio sono stati cotti in forni con picchi di calore estremamente alti; lo spessore e l'altezza della muratura influiscono sulla capacità di resistenza alle fiamme della struttura.

La stessa cosa non si può dire per i mattoni forati, che risultano essere invece molto più sensibili alle alte temperature, anche a quelle non troppo ingenti); per far fronte a questo problema, anche solo un semplice intonaco di malta ordinaria di calce potrebbe essere utile se usato come protezione antincendio: quando c'è un muro intonacato, la crescita delle temperature all'interno della muratura non è rapida e improvvisa come quando la è spoglia, ma aumenta poco a poco.

La resistenza al fuoco dei mattoni in laterizi è tanto maggiore quanto meglio è stata realizzata la muratura, e come si è visto dipende molto dal tipo di malta utilizzata nei legamenti tra i corsi di mattoni.

Per aumentare la sollecitazione alle alte temperature di una struttura costituita in laterizi è utile anche l'installazione di cordoli di cemento armato, che risultano essere una buona misura di cerchiatura orizzontale; questo tipo di installazione ostacola il piegamento di murature e l'innescò di probabili meccanismi di ribaltamento al piede verso l'esterno.

Comunque, è dalla combinazione di intonaco e muro che scaturisce la capacità di resistere alle fiamme della muratura.

## 3.2 I materiali ignifughi per rivestimenti antincendio

Lo scopo di questo paragrafo sarà descrivere le caratteristiche dei materiali impiegati per tutti quegli accorgimenti messi in atto per ridurre l'eventualità di innesco di un incendio, e comunque per minimizzarne gli effetti di una sua propagazione, una volta che esso abbia avuto inizio.

Agendo sulle strutture in termini di protezione antincendio, è possibile intervenire per riqualificare gli elementi interessati al fine di aumentarne le capacità di resistenza al fuoco applicando all'estradosso dei pannelli ignifughi.

In questo senso esistono molteplici materiali da costruzione utilizzati nelle diverse soluzioni passive, con l'obiettivo comune di preservare e di aumentare la stabilità (R), la tenuta (E) e l'isolamento (I) di un determinato particolare costruttivo.

Le norme che regolano tali prodotti sono:

- EN 13163: polistirene espanso (EPS);
- EN 13164: polistirene estruso (XPS);
- EN 13165: poliuretano (PUR);
- EN 13167: vetro cellulare;
- EN 13169: perlite espansa;
- EN 13171: fibra di legno;

Questi riferimenti normativi elencano i livelli e le classi che devono essere riportate dal produttore in riferimento alle prestazioni ottenute dai prodotti testati, e non specificano livelli minimi di prestazione.

Di seguito verrà fornita la descrizione sulla composizione e sulla risposta in caso di incendio relative ai materiali che vengono impiegati nella realizzazione di pannelli ignifughi e altri rimedi antincendio, ovvero prodotti che vengono proposti sul mercato per la protezione di pareti, solai, travi e pilastri.

I composti chimici di cui sono costruite le lastre antincendio maggiormente diffuse in commercio sono:

- Calcio fibrosilicato (classe A1) a elevata resistenza meccanica, che trova impiego in lastre a base di calcio fibrosilicato, o a media densità o in accoppiamento con uno strato di lana di roccia ad alta densità;
- Cemento alleggerito fibrorinforzato (classe A1);

- Silicati e solfati di calcio (classe A1), spesso accoppiati con lastre a base cementizia prodotte per laminazione con controllo dell'essiccazione;
- Fibre minerali e alcaline non biopersistenti (classe A1);
- Silicati a matrice cementizia senza amianto, impiegati in lastre prodotte in autoclave (classe A1);
- Vetro cellulare (classe A1) a struttura minerale a cellula chiusa e senza legante.

Tra i principali materiali isolanti in genere utilizzati nella realizzazione di sistemi di rivestimento esterni spiccano per proprietà ignifughe e per il largo impiego:

- *Polimeri termoindurenti*, come la schiuma di poliuretano (PUR), Poliuretano Espanso (PIR), Resine fenoliche espanse;
- *Polimeri Termoplastici*, come il Polistirene espanso (EPS), Polistirene estruso (XPS), Polietilene (PE);
- *Prodotti minerali a base di fibra*, come lana di roccia, lana di vetro...
- *Aerogel*.

I prodotti minerali sono caratterizzati da un basso livello di infiammabilità e una classificazione come materiali incombustibili; i polimeri invece hanno un alto grado di partecipazione all'incendio.

In particolare l'EPS risulta essere un prodotto facilmente combustibile, ma è largamente utilizzato come componente nei sistemi di rivestimento esterni per l'isolamento termico.

L'impiego dell'EPS nelle costruzioni, a seconda delle caratteristiche e proprietà di facciata che si vogliono ottenere, trova impiego con e senza ritardante al fuoco:

- senza ritardante alla propagazione della fiamma (in questo caso il campione di polistirene espanso verrà classificato in classe di reazione F in base al sistema di classificazione europeo);
- con ritardante alla propagazione della fiamma.

Vista la classificazione di reazione al fuoco F secondo la norma EN 13501-1 (*Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 1: Classificazione in base ai risultati delle prove di reazione al fuoco*) è evidente che un provino in EPS senza ritardante di fiamma non è in grado di superare alcun test come prodotto da costruzione.

Si ricorda infatti che nella maggior parte delle nazioni l'utilizzo dei prodotti classificati nell'Euro classe F non è consentito, indipendentemente se tali materiali trovino impiego in pannellature coibentate da schermi termici capaci di garantirne una buona prestazione in caso di incendio.

In Europa quindi è diffusa la pratica di impiego dell'EPS solo se provvisto di ritardante di fiamma-

Dopo la digressione sui prodotti in EPS e l'introduttiva panoramica sui principali materiali impiegati nella realizzazione di sistemi di rivestimento esterni, essi verranno ora esaminati nel dettaglio<sup>4</sup>.

### ***3.2.1 PUR e PIR: schiuma di poliuretano e poliuretano espanso***

Il PUR è un prodotto si origina dalla miscela a base d'aria di due prodotti, il poliolo e l'isocianato, entrambi in stadio liquido. Durante la produzione, il calore di reazione consente la formazione dell'elemento espansore che verrà messo dentro o spruzzato sulla parte esposta del prodotto che si vuole coibentare: si parla di espansione del poliuretano per descrivere il significativo aumento volumetrico del liquido in schiuma.

A causa della loro composizione di particelle combustibili ed essendo materiali polimerici, i PUR e i PIR causano spesso l'ignizione e la diffusione delle fiamme durante un incendio: quando sottoposti ad alte temperature, questi materiali cominciano a decomporsi producendo particelle e fuliggine altamente infiammabili.

Una volta che queste particelle infiammabili si miscelano con l'ossigeno dell'atmosfera attorno alla posizione dei polimeri, prende il via il fenomeno di combustione, che continua fino a quando il materiale polimero si sia completamente degradato, o fino al momento in cui il calore trasmesso dalla fiamma al polimero è sufficiente a far perdurare nel tempo la sua velocità di consumazione superiore a un valore minimo necessario per l'alimentazione.

Essendo composte da strutture cellulari, le schiume di PUR e PIR sono altamente infiammabili e, durante la decomposizione termica, rilasciano fumi densi e tossici, la cui composizione è ricca di prodotti velenosi.

Durante la loro combustione, inoltre, vengono raggiunte temperature elevate in tempi brevi, con conseguente accelerazione dei processi di degradazione del materiale.

È pur sempre vero che, a seguito di ricerche sulla loro stabilità termica e sui meccanismi di degradazione, è oggi possibile stimare le condizioni ottimali di utilizzo dei PUR e dei PIR, e capire quali possano essere i miglioramenti per il loro comportamento al fuoco, come gli additivi che tardano la combustione.

---

<sup>4</sup> I riferimenti numerici riportati nelle tabelle successive e parte di quanto scritto hanno come fonte d'origine il sito, riportato in bibliografia, nel link <http://www.coibentare.net/materiali.html>

L'infiammabilità dei gas che vengono rilasciati durante il processo è inoltre un fattore che riveste assoluta importanza per quanto riguarda la partecipazione dei materiali e lo sviluppo della combustione per questa famiglia di materiali.

A causa della loro natura e della caratteristica elevata infiammabilità, i materiali polimerici trovano impiego soltanto in particolari settori, a esclusione però dei reparti edilizi o dei trasporti, o comunque in quelli dove il rischio di incendio e la sua pericolosità sono di particolare rilievo.

Nella pratica realizzare un materiale polimerico completamente inerte all'azione del fuoco non è fattibile; ricorrente è l'espedito utilizzato per diminuire la capacità di innesco e di propagazione dell'incendio: è ormai di largo uso l'impiego di additivi e ritardanti di fiamma applicati, capaci in sostanza di rallentare la combustione di un polimero.

Non è sempre determinabile con facilità il meccanismo di reazione alla base del funzionamento dei ritardanti di fiamma: ciò perché molte volte i processi di reazione sono più di uno, ed è possibile che siano l'uno la conseguenza dell'altro. I meccanismi mediante i quali spesso agiscono i ritardanti di fiamma, in fase liquida o gassosa, sono:

- diluizione della miscela gassosa mediante l'insufflazione di inerti;
- l'abbassamento della temperatura delle fiamme grazie all'impiego di reazioni di temperatura;
- impedimento della diffusione chimica della fiamma;
- impedimento della formazione di particelle volatili;
- impedimento della fusione del polimero.

La scelta di un determinato tipo di ritardante di fiamma può essere data caso per caso, e dipende dalla natura dell'additivo che si vuole aggiungere, dalle caratteristiche del polimero, dall'eventuale presenza di altri materiali, o anche dalle condizioni al contorno durante il processo di combustione.

Come già detto prima, le diverse tipologie di ritardanti di fiamma si possono usare anche più alla volta e insieme, così da usufruire di eventuali effetti di collaborazione.

Il PUR è poliuretano espanso normalmente utilizzato per la produzione di pannelli coibentati.

Il PIR è poliuretano espanso additivato con ritardanti di fiamma Broof (t2)<sup>5</sup> classe di reazione al fuoco Bs2d0.

Si riporta una tabella (Tabella 3.2) riassuntiva della conducibilità termica del materiale (i valori possono cambiare da produttore a produttore):

**Tabella 3.2.** Conducibilità termica del poliuretano espanso in funzione della densità.

kg/m <sup>3</sup>	W/mK
15	0.040
20	0.039
40	0.038

### 3.2.2 Le resine fenoliche

La resina fenolica è tra i migliori isolanti termici con un  $\lambda = 0,021$ .

La schiuma di resina fenolica espansa è classificata nella classe di reazione al fuoco B-s1 d0; il suo impiego permette agli elementi di natura sintetica di assicurare la massima resistenza alle alte temperature, in quanto la sua conformazione chimica assicura la totale assenza alla partecipazione di un incendio ed è in grado di autoestinguersi. Un'altra peculiarità per cui questo materiale trova largo impiego è la sua caratteristica di non emettere fumi tossici di combustione.

La resina fenolica è inoltre un prodotto caratterizzato da una elevata robustezza e da un basso peso specifico (35 kg/m<sup>3</sup> di media), il che contribuisce ad accrescere il suo elevato potere isolante.

La resina fenolica diffusamente usata ha una struttura cellulare molto fine e densa, che ne determina resistenza meccanica a compressione<sup>6</sup>.

La produzione delle resine fenoliche avviene in seguito della miscelazione veloce di tre elementi, quali resina fenolica, additivo per la schiuma, e induritore; al termine del

<sup>5</sup> Broof è una classificazione che fa riferimento al comportamento al fuoco dall'esterno ed è suddivisa in (t1), (t2), (t3) e (t4), dove la progressione numerica indica il diverso metodo di prova.

<sup>6</sup> La resistenza alla compressione rappresenta la capacità di un materiale di resistere a una sollecitazione data da una forza di compressione applicata a una velocità prefissata in direzione perpendicolare alle facciate principali del materiale. Tale resistenza viene espressa in kPa.



processo di miscelazione, la reazione della resina, insieme all'azione dell'additivo, determina la formazione del materiale espanso indurito.

I pannelli di resina fenolica sono spesso impiegati per i tetti delle costruzioni, essendo materiali in grado di conservare nel corso degli anni la loro fisionomia e la loro estensione volumetrica, anche se continuamente esposti a intemperie atmosferiche durante il loro esercizio.

Si riporta una tabella (Tabella 3.3) riassuntiva della conducibilità termica del materiale (i valori possono cambiare da produttore a produttore):

**Tabella 3.3.** Conducibilità termica delle resine fenoliche in funzione della densità.

kg/m <sup>3</sup>	W/mK
20	0.024
40	0.023
60	0.021

### 3.2.3 EPS e XPS: polistirene espanso e polistirene estruso

La composizione dell'EPS presenta una struttura cellulare di atomi di C e H.

È classificato in classe 1 e un Euro classe E.

Si riporta ora la tabella dei valori di conducibilità in funzione della densità.

**Tabella 3.4.** Conducibilità termica del polistirene espanso in funzione della densità.

kg/m <sup>3</sup>	W/mK (a 10°C)	W/mK (a 20°C)
15	0.036	0.041
20	0.036	0.037
25	0.035	0.036

Per fabbricare lastre e pannellature espanse di polistirene estruso, le piccole sfere di polistirene cristallino vengono lavorate fino alla loro fusione, e viene aggiunto loro un espandente; dopo questa lavorazione è possibile ottenere un composto molto leggero e resistente alla compressione, grazie anche alla sua composizione a celle chiuse.

Si riporta una tabella (Tabella 3.5) riassuntiva della conducibilità termica del materiale (i valori possono cambiare da produttore a produttore):

*Tabella 3.5. Conducibilità termica del polistirene estruso in funzione della temperatura a cui si trova*

°C	W/mK
10	0.036
20	0.037

La necessità, imposta dalla legge, di riuscire ad ottenere prodotti a base di espansi polistirenici (EPS e XPS) sempre più prestanti dal punto di vista della loro reazione al fuoco, è uno stimolo allo studio di ritardanti di fiamma sempre più validi.

Tra questi è da ricordare l'impiego associato tra i composti bromurati e l'ossido di antimonio, additivi assolutamente prestanti dal punto di vista antincendio, capaci di raggiungere i limiti di reazione al fuoco imposti dalla legge.

Per aggirare il problema della bioaccumulabilità<sup>7</sup> derivante dall'eccessivo impiego di ritardanti di fiamma alogenati, si cerca al giorno d'oggi di far ricadere la propria scelta su sistemi non alogenati, in particolare su antifiamma fosforici.

Il meccanismo chimico attraverso cui agisce un additivo si basa sul cambiamento dell'azione della combustione sulla superficie esposta, eliminando quanto più possibile la produzione di gas combustibile ( $\Delta H_2$ ), e favorendo la formazione di uno strato

---

<sup>7</sup> “La bioaccumulabilità è il processo attraverso cui sostanze tossiche inquinanti organici persistenti si accumulano all'interno di un organismo, in concentrazioni superiori a quelle riscontrate nell'ambiente circostante”.- Definizione presa da <https://it.wikipedia.org/wiki/Bioaccumulo>

carbonioso, anidride carbonica e H<sub>2</sub>O. La produzione di gas combustibile quindi diminuisce man mano che si aumenta la quantità di agente antifiamma.

Grazie a questo processo si riesce a ridurre la quantità di calore, e il processo di combustione risulta di fatto rallentato essendo caratterizzato da temperature più basse.

### 3.2.4 PE: polietilene espanso

Per la realizzazione del polietilene espanso si ricorre all'espansione tramite insufflazione del gas che ne aumenta il volume; il prodotto ottenuto viene poi fatto passare attraverso una pressa che ne determina lo spessore, compattezza e l'estensione.

La composizione fisica del polietilene espanso presenta una combinazione di microcelle chiuse, una conformazione che permette di alleggerire il peso del prodotto finale, aumentandone di fatto l'impermeabilità, la resistenza a sopportare carichi assiali e azioni di taglio, e la resistenza alle alte temperature.

La sua reazione al fuoco è indicata in classe 1 (D.M. del 14/01/85), euroclasse BL-s1d0.

Si riporta una tabella (Tabella 3.6) riassuntiva della conducibilità termica del materiale (i valori possono cambiare da produttore a produttore):

*Tabella 365. Conducibilità termica del polietilene espanso in funzione della temperatura a cui si trova*

°C	W/mK
40	0.040
10	0.038

### 3.2.5 Prodotti minerali a base di fibra

#### 3.2.5.1 Lana di vetro

Il processo industriale per la costruzione di pannelli, fogli e qualsiasi altro tipo di rivestimento in lana di vetro è il risultato della sinterizzazione di vetro e polvere di carbone, la cui composizione risulta quindi ricca di residui vetrosi.

Non partecipa alle reazioni di combustione e presenta un'ottima capacità di resistenza alle fiamme.

È classificata come incombustibile di classe 0 (ISO - DIS 1182.2).

Si riporta una tabella (Tabella 3.7) riassuntiva della conducibilità termica del materiale (i valori possono cambiare da produttore a produttore):

**Tabella 3.7.** Conducibilità termica della lana di vetro in funzione della temperatura a cui si trova

°C	W/mK
50	0.045
100	0.053
200	0.070
300	0.087

### 3.2.5.2 Lana di roccia

È classificata come non combustibile (D.M. del 14/01/85).

Si riporta una tabella (Tabella 3.8) di sintesi della conducibilità della lana di roccia (i valori possono cambiare da produttore a produttore):

**Tabella 3.8.** Conducibilità termica della lana di roccia in funzione della temperatura a cui si trova

°C	W/mK
100	0.047
200	0.071
300	0.095
400	0.126

### 3.2.5.3 Vetro cellulare

Il processo industriale per la costruzione di pannelli, fogli e qualsiasi altro tipo di rivestimento in vetro cellulare è il risultato dell'espansione di una composizione di vetro e residui carboniosi, che le conferiscono ottime proprietà: è indeformabile, non è organico, resiste alle sollecitazioni assiali, all'acqua, assolutamente privo di amianto e leganti chimici.

Non è un materiale combustibile e presenta un'ottima capacità di resistenza al fuoco.

Il vetro cellulare è classificato come incombustibile di classe 0 a alla temperatura (D.M. del 14/01/85).

Si riporta una tabella (Tabella 3.9) riassuntiva della conducibilità termica del materiale (i valori possono cambiare da produttore a produttore):

**Tabella 3.9.** Conducibilità termica del vetro cellulare in funzione della temperatura a cui si trova

°C	W/mK
-170	0.0197
-100	0.0259
-50	0.0317
0	0.0385
20	0.0415
50	0.0465
100	0.0555
200	0.0772
300	0.1034
400	0.1345

### 3.2.5.4 Calcio silicato

Il processo industriale per la costruzione di pannelli, fogli e qualsiasi altro tipo di rivestimento in calcio silicato è il risultato della mescolazione e della successiva

ebollizione del composto formato da acqua, elementi silicei, calce, e altri composti chimici; una volta asciutto, il composto viene messo in autoclave affinché si compia la reazione chimica che permette la formazione del silicato di calcio.

Questo tipo di materiale è preferibile ad altri in quanto esente da amianto.

Non è un materiale combustibile e presenta un'ottima capacità di resistenza al fuoco.

Il calcio silicato è classificato come incombustibile di classe 0 a alla temperatura (D.M. del 14/01/85).

Si riporta una tabella (Tabella 3.10) riassuntiva della conducibilità termica del materiale (i valori possono cambiare da produttore a produttore):

*Tabella 3.10. Conducibilità termica del calcio silicato in funzione della densità.*

kg/m <sup>3</sup>	W/mK (a 200°C)	W/mK (a 450°C)
240	0.082	0.119
290	0.108	0.130

### 3.2.6 L'aerogel

I materiali alla base della sua composizione sono elencati di seguito.

Nel suo composto c'è molta aria (quasi la totalità della sua composizione totale) e la restante parte di silice; questa conformazione chimica e fisica permette al composto di vantare una conducibilità termica estremamente bassa (da 0,003 W/mK a 0,004 W/mK).

L'aerogel di silice compatto è quindi caratterizzato da una conducibilità molto esigua, ma risulta essere un materiale molto poco flessibile e tanto frangibile; se si volesse aumentare la flessibilità del composto, esso deve essere combinato a un rinforzo fibroso: ciò però causerebbe la perdita di una parte delle sue caratteristiche di non conducibilità.

L'aerogel è classificato in base alla sua reazione al fuoco in Euroclasse C – s1, d0.

# Capitolo 4

## Eventi incidentali noti

Negli ultimi anni, il grande processo di espansione urbana ha portato alla ribalta la problematica del bisogno dello sviluppo di novità nel settore edile antincendio, ad esempio per quanto riguarda la progettazione e la realizzazione dell'involucro esterno.

Quest'ultimo assume un ruolo fondamentale relativamente alla propagazione dell'incendio, come si è già visto riguardo gli scenari di incendio elencati e descritti al Capitolo 2§.

Nel corso della storia, la progettazione di facciate di edifici civili ha infatti riscontrato differenti problematiche, che hanno causato drastiche conseguenze per quanto riguarda la sicurezza delle persone e dei beni in caso di incendio.

Le cause degli incendi in facciata, i cui sviluppi e scenari sono stati descritti nello specifico al §2.2, sono maggiormente da ricercarsi nella capacità di reazione al fuoco del rivestimento esterno: come si è già visto, questo contribuisce spesso e significativamente alla propagazione delle fiamme da un compartimento ad uno sovrastante, e, nella maggior parte dei casi, si verificano le condizioni per cui neanche il tempestivo intervento delle preparate squadre dei Vigili del Fuoco sarebbe in grado di evitare la diffusione dell'incendio sull'edificio.

Si riportano di seguito alcuni esempi di eventi incidentali di incendio di facciata, che presentano una breve descrizione dell'edificio e dello sviluppo dell'incendio, con funzione di sensibilizzazione alla tematica affrontata nell'elaborato: la corretta esaminazione e della certificazione dei materiali da costruzione e il loro impiego per evitare la propagazione dell'incendio in edifici attraverso la facciata. Da questi casi storici è emerso che le conseguenze dello stesso sarebbero state di gran lunga minori se i sistemi di facciata fossero stati progettati ed installati correttamente.

Per le informazioni riguardo le casistiche presentate e le proprietà architettoniche delle strutture, sono state riportate nella bibliografia e nella sitografia le fonti consultate (pubblicazioni, articoli di cronaca ecc.).

## 4.1 Grenfell Tower (Londra, Inghilterra)

L'incendio della Grenfell Tower di Londra è avvenuto nella notte fra il 13 ed il 14 giugno 2017 (Figura 4.1). La conta del numero delle vittime rimane ancora un dato incerto (le stime parlano comunque di 87 morti) a causa dell'impossibilità di conoscere il numero esatto delle persone presenti in quel momento all'interno dell'edificio; inoltre, le terribili condizioni con cui sono stati ritrovati i resti dei corpi hanno reso quasi impossibile il riconoscimento degli abitanti.



*Figura 4.1. Immagine reale dell'incendio della Grenfell Tower*

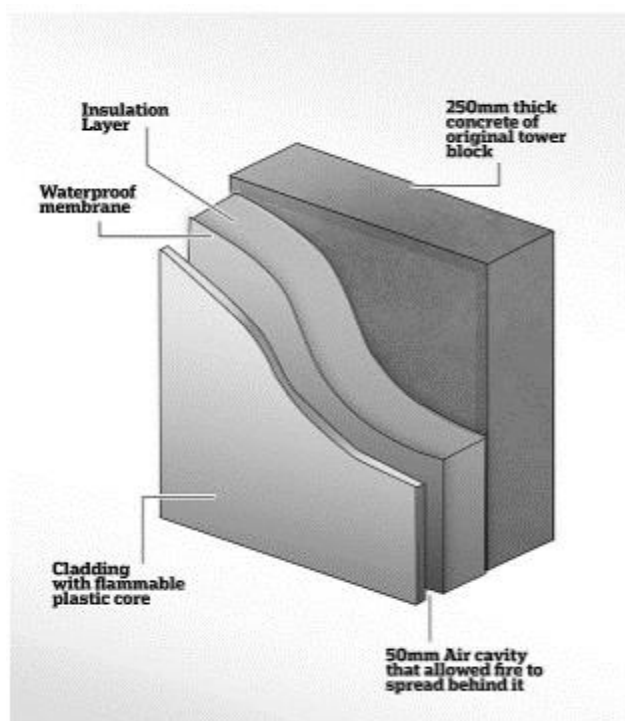
Il caso in questione ha sollevato molte critiche: da quanto riportato nei principali giornali di cronaca, l'incendio si è sviluppato al quarto piano dell'edificio, propagandosi molto velocemente, e raggiungendo il 24° piano in meno di un quarto d'ora.

La forte velocità di propagazione delle fiamme è un fenomeno da imputare alla composizione del rivestimento aggiunto nella ristrutturazione del 2016, al termine della quale è stata applicata sulla facciata della struttura un sistema a facciata ventilata realizzata con materiali isolanti, aventi la precisa funzione di isolamento per accrescere il confort termico all'interno dell'edificio.



La configurazione di facciata ventilata prevede uno spazio d'aria tra la muratura ed il rivestimento esterno: per l'effetto camino che si verifica in caso di incendio, spiegato nei capitoli precedenti, tale vuoto d'aria ha facilitato la propagazione del fuoco verso i piani superiori, con velocità davvero importanti.

Il rivestimento esterno della Grenfell Tower era composto da pannelli Celotex RS5000, fissati al cemento armato della struttura, in PIR (poliuretano espanso additivato rigido, una plastica termoindurita tipicamente prodotta come schiuma) di 150 mm di spessore, rivestite da lastre di alluminio Reynobond PE a doppio spessore di 3 mm, con nucleo in polietilene; l'intercapedine ventilata tra i pannelli e le lastre di 50 mm avrebbe agito come propagatore per le fiamme (Figura 4.2).



*Figura 4.2. Layer del rivestimento esterno della Grenfell Tower*

Dalle indagini emerse che i pannelli compositi dovevano essere forniti nella versione FR-Fire Retardant (con un nucleo minerale), leggermente più caro ma in grado di ritardare più efficacemente il fuoco; il team di ristrutturazione preferì il pannello meno caro ma più infiammabile.

I prodotti utilizzati per il rifacimento della facciata ventilata non presentavano, quindi, una classificazione di reazione al fuoco abbastanza alta.

I pannelli a sandwich Reynobond PE ma soprattutto l'isolante Celotex RS5000, sono classificati dalle case produttrici come materiali combustibili; il loro impiego ha

certamente contribuito alla rapidissima propagazione delle fiamme e alla massiccia produzione di fumi tossici.

Il perché della scelta di questi pannelli è ancora da verificare: i giornali denunciano la volontà dei responsabili della ristrutturazione di aver optato per la soluzione più economica, anche se non insiste una grossa differenza di prezzo tra il sistema usato e quello in versione FR (trattate cioè con dei ritardanti di fiamma) che le case produttrici di entrambi i materiali hanno in catalogo.

Nello specifico il pannello sandwich esterno Reynobond PE è riempito con un materiale con pessime proprietà di reazione al fuoco, a differenza delle caratteristiche del pannello Reynobond FR, presentato dalla stessa casa produttrice, classificato in classe B-s1 d0, quindi con comportamento al fuoco molto buono, che ha un costo per metro quadro di poco maggiore del Reynobond PE.

Il pannello Celotex FR5000 raggiunge una classificazione di reazione al fuoco di Class 0 (BS 476); la Class 0 inglese corrisponde all'Euroclasse B-s3 d2 secondo la EN 13501, ovvero la Classe 2 italiana secondo il D.M. 15/03/2005 ed il D.M. 16/02/2009.

## **4.2 Marina Torch (Dubai, Emirati Arabi Uniti)**

Il Marina Torch di Dubai è un grattacielo con destinazione d'uso residenziale, di 79 piani per 351 m di altezza, che presenta una struttura in pilastri in cemento armato. Le forme ed i materiali che compongono la facciata continua esterna trasparente variano lungo l'altezza dell'edificio (Figura 4.3).



**Figura 4.3.** *Il Marina Torch evidenziato dal rettangolo rosso nel contesto urbanistico di Dubai*

L'incendio che lo ha visto coinvolto si è innescato il 21/02/2015, al 51esimo piano. Grazie anche all'imponente vento che tirava quel giorno, con raffiche registrate fino ai 50 km/h, le fiamme si sono propagate lungo la facciata fino al 71esimo piano.

La parte più colpita dalle fiamme e maggiormente danneggiata dall'incendio è stata la facciata esterna dell'edificio, essendo presente, all'interno della struttura, un nuovissimo ed efficiente sistema di protezione attiva interna formato da sprinkler, e di protezione passiva formato da una buona compartimentazione antincendio.



*Figura 4.4. Immagine reale dell'incendio del Marina Torch*

Le fiamme si sono quindi propagate rapidamente fino al 70esimo piano, frantumando, a causa delle alte temperature raggiunte, centinaia di vetri esterni, che hanno causato una pioggia di detriti nel cortile del palazzo e lungo le arterie della città; tale fenomeno ha inoltre innescato un ulteriore incendio su un altro fronte dell'edificio, al 30esimo piano.

La propagazione del fuoco ha riguardato principalmente la finitura esterna dell'edificio: le cause di questo fatto sono da imputarsi alla realizzazione della facciata, costituita da pannelli realizzati da due fogli di metallo composito con riempimento in schiuma isolante combustibile.

Applicata alla facciata dell'edificio e avente finalità di coibentazione, questa finitura esterna è stata oggetto di numerose critiche, quale possibile veicolo alla diffusione del fuoco.

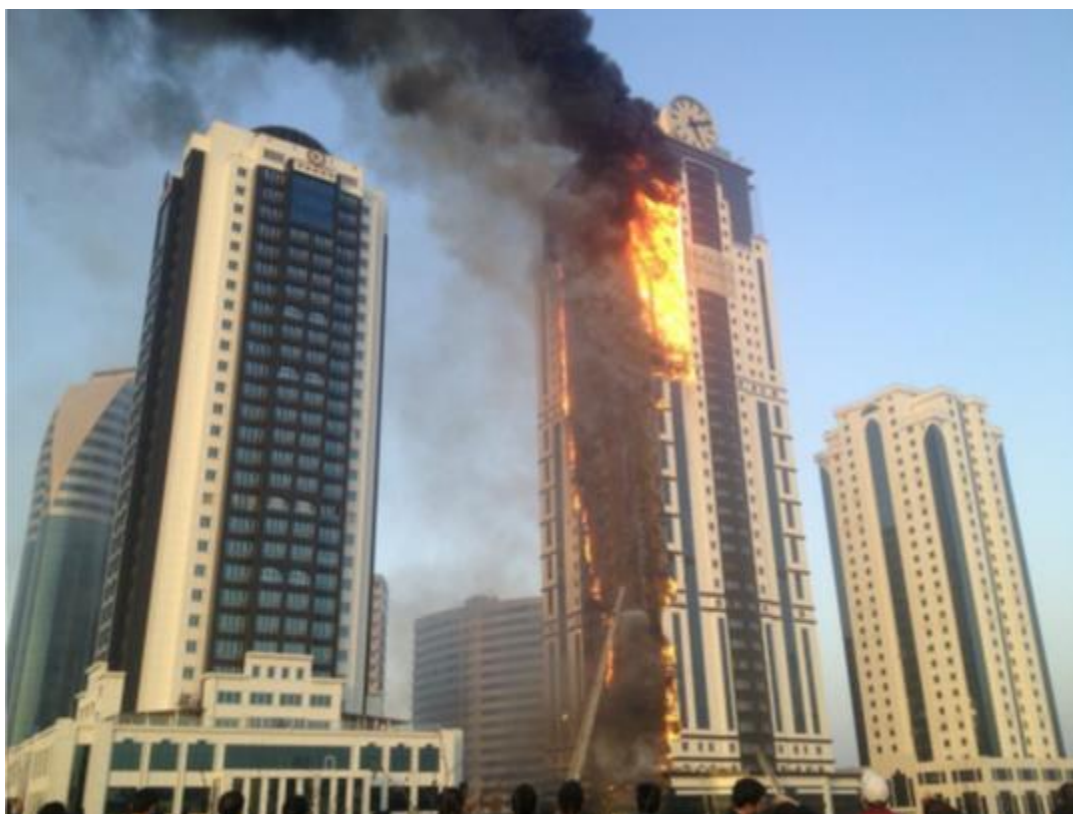
Nello specifico, il pannello di rivestimento era costituito da materie plastiche a bassa densità. (poliuretano) racchiuse all'interno di uno strato di fogli di alluminio di basso spessore; questo pannello di rivestimento è un pannello composito in alluminio con struttura a sandwich, che rimanda quindi alla casistica presentata precedentemente dell'incendio alla Grenfell Tower.

Un'altra caratteristica sfavorevole che viene presentata come critica all'utilizzo di questi pannelli è il fatto che l'alluminio presenta un basso punto di fusione (pari a 660°C), tale da favorire la propagazione dell'incendio sia nel piano che in elevazione.

Per ovviare a questo problema si sarebbe potuto ricorrere, almeno, all'installazione di una striscia tagliafuoco ad altezze prestabilite.

### 4.3 Torre Olympus (Grozny, Cecenia)

Il 3 aprile 2013, alle ore 18:00 PM ora locale (14:00 GMT), un vasto incendio (Figura 4.5) ha colpito il grattacielo di 40 piani più alto di Grozny, in Cecenia, facente parte di un complesso urbanistico, il Grozny- City Cecenia.



*Figura 4.5. Immagine reale dell'incendio della Torre Olympus*

Il complesso edilizio, le cui operazioni di costruzione sono terminate nell'anno 2011, è costituito da sette grattacieli, di cui uno è un hotel, mentre le altre costruzioni sono adibite a uffici e civili abitazioni (si contano in tutto più di 1000 appartamenti).

Quando è divampato l'incendio, la gravità del caso ha obbligato le autorità all'impiego di elicotteri per le operazioni di spegnimento: questi però, a causa della fitta rete di edifici di grande altezza, ma non hanno potuto svolgere i loro compiti di soccorso.

I vigili del fuoco in azione non hanno quindi potuto far altro che combattere le fiamme da terra, fino a raggiungere l'estinzione della sola parte inferiore della struttura.

La parte più alta, composta dagli ultimi piani dell'edificio, ha continuato a bruciare, e senza che alcun tipo di intervento venisse effettuato, il fuoco si è diffuso molto rapidamente per praticamente tutti i 145 metri, altezza dell'intero lato del fabbricato, danneggiando circa 14mila metri quadrati di facciata, e distruggendo buona parte del rivestimento esterno del grattacielo.

Gli interni, fortunatamente, non sembrano avere subito danni gravi.

L'edificio è stato completamente restaurato e ricostruito (il cantiere è terminato il 2015), visto che durante il disastro del 2013 la struttura portante, che ha resistito al fuoco, è rimasta in piedi.

Per far intendere la gravità del fenomeno che ha interessato l'edificio, un particolare del rivestimento esterno completamente arso è riportato nella figura sottostante (Figura 4.6).



*Figura 4.6. Resti della facciata esterna interessata dall'incendio*

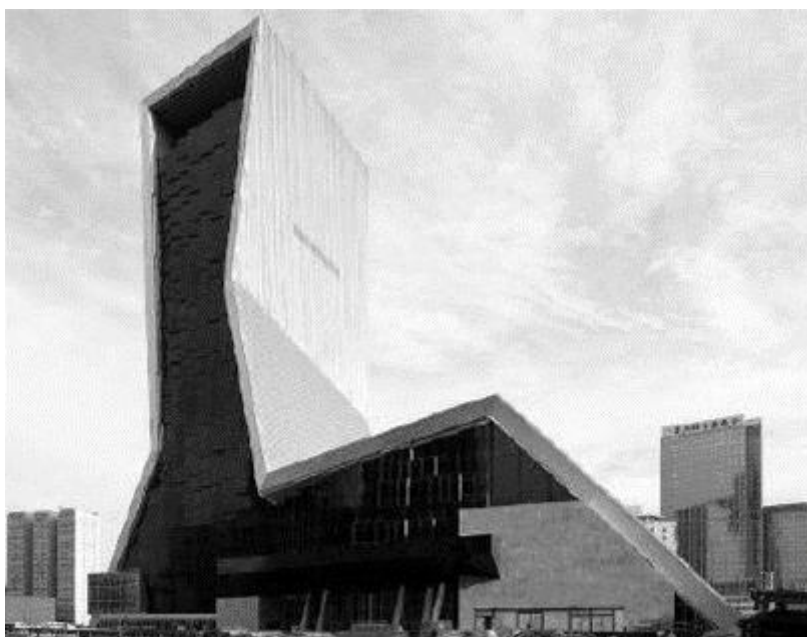
La rapida velocità di propagazione dell'incendio, causata come detto soprattutto dai forti venti e dall'impossibilità di intervento da terra, non ha trovato contrasti anche a causa della presenza di pannelli del rivestimento di facciata costituiti da pannellature a sandwich, realizzate con materiale composito formato da due lamine di alluminio accoppiate ad un nucleo in polietilene (di natura uguale a quelli installati nelle casistiche precedenti).

La struttura e composizione dei pannelli di rivestimento sono analoghe a quanto descritto per la Marina Torch e per la Grenfell Tower, e la conseguente causa della propagazione delle fiamme sono chiaramente imputabili alle stesse per i motivi già esposti nei paragrafi precedenti.

#### 4.4 TVCC Television Cultural Centre (Pechino, Cina)

L'edificio è un grattacielo multifunzionale di 44 piani, di altezza pari a 159 m e 95000 m<sup>2</sup> di superficie.

L'opera è stata completata nel 2012, e presenta una forma irregolare, comprendendo volumi strutturalmente diversificati e indipendenti tra loro, tra cui un teatro di 1500 posti, cinema digitali, studi di registrazione, centri d'incontro, un impianto termale, e un'attività alberghiera all'interno della torre, dove spicca la facciata continua che si estende su tutta la superficie (Figura 4.7).



*Figura 4.7. Veduta della TVCC terminata.*

La facciata nord e quella sud erano facciate trasparenti, mentre il rivestimento della facciata est e quello a ovest era realizzato in pannelli di metallo a base di lega di titanio e zinco, con riempimento in XPS ed una camera d'aria tra il rivestimento e lo strato isolante.

L'incendio è scoppiato il 9 febbraio 2009 (Figura 4.8).



*Figura 4.8. Immagine reale dell'incendio della TVCC*

Secondo quanto riportato dalle testate di cronaca internazionali, l'incendio si è innescato sul tetto dell'edificio a causa di una procedura di saldatura non correttamente eseguita: le scintille provocate da queste manovre di saldatura hanno raggiunto l'interno dei pannelli metallici di cui la facciata era costruita, incendiando lo strato isolante in XPS.

Il gocciolamento delle particelle liquide prodotte dalla combustione del materiale XPS hanno determinato poi la propagazione dell'incendio sulla facciata lungo i piani inferiori. A causa di un forte vento, l'intera torre è stata invasa dalle fiamme in meno di 20 minuti.

Materiali isolanti combustibili senza barriere antincendio, ovvero l'uso di materiali inadeguati per il rivestimento della facciata, hanno sicuramente contribuito all'ampia diffusione del fuoco.

## **4.5. Altri casi di incendio civile di facciata**

### 4.5.1 Ostello della gioventù (Digione, Francia)



L'incendio, che ha interessato un edificio residenziale, ha avuto luogo a Digione, in territorio francese, il giorno 14 novembre 2010.

L'incendio è scaturito all'interno di un cassonetto di immondizia esterno, posizionato in prossimità della costruzione. La rapida propagazione delle fiamme lungo la facciata verticale ha interessato e distrutto il sistema di isolamento esterno realizzato con EPS (polistirene espanso senza ritardante di fiamma) e le barriere antincendio in lana minerale.

Il forte vento che insisteva quel giorno ha contribuito sicuramente alla propagazione veloce delle fiamme lungo la facciata, lungo soprattutto la parte rientrante dell'edificio, dove la struttura architettonica aveva previsto il posizionamento dei balconi (Figura 4.9).



*Figura 4.9. Conseguenze dell'incendio dell'ostello di Digione*

#### 4.5.2 Abitazione civile (Miskolc, Ungheria)

L'incendio, che ha provocato la morte di tre persone, avuto luogo in Ungheria il 15/08/2009, propagatosi dal sesto piano in una cucina di una proprietà residenziale, e interessando poi l'intera facciata verticale (rivestita con pannelli di EPS) fino alla copertura dell'edificio all'undicesimo piano (Figura 4.10).



*Figura 4.10. Conseguenze dell'incendio sulla facciata dell'edificio di abitazione civile a Miskolc*

L'edificio, realizzato nel 1968, è stato oggetto di un invasivo processo di ristrutturazione, terminato nel 2007, che ha comportato la realizzazione della facciata con un sistema di pannelli EPS, che come si è già detto è un materiale facilmente combustibile.

La rapida propagazione delle fiamme dell'incendio è stata favorita sia a causa dell'assenza di barriere al fuoco attorno alle aperture, sia in relazione all'uso improprio dei pannelli in polistirene espanso, installati senza alcuna protezione ignifuga all'estradosso (non era neanche stato applicato l'intonaco adeguato di finitura, ma solamente uno strato di spessore pari a 2-3 mm, contro i 5 mm richiesti).

# Capitolo 5

## Prove per la caratterizzazione del comportamento al fuoco dei materiali

Dopo aver già fatto una panoramica sulla normativa concernente la classificazione della reazione al fuoco dei materiali da costruzione (§1.3 e §1.4), in questo capitolo si esamineranno i test impiegati per la caratterizzazione del comportamento al fuoco, in riferimento a quanto espresso nelle relative norme EN e UNI ed aiutandosi con pubblicazioni citate nella bibliografia.

### 5.1 Generalità

Con l'intento di poter riconoscere e valutare i risultati della partecipazione all'incendio e della reazione al fuoco dei materiali da costruzione sono state redatte molte modalità di prove diverse tra loro da come viene stimata la diffusione dell'aumento della temperatura e il trascinarsi di prodotto.

Il risultato finale e lo scopo a cui questi test mirano sono sicuramente di carattere informativo, e riguardano la necessità di saper valutare la partecipazione all'incendio di un qualsiasi prodotto (o di un provino tratto da questo) da costruzione in commercio se esposto alle alte temperature.

Questi test cercano di simulare uno degli scenari citati al §2.1.2.

- *l'Underwriters Laboratories 94 (UL 94)*, per una valutazione qualitativa del comportamento alla combustione (§5.3);
- *l'indice di ossigeno (LOI)*, per una valutazione quantitativa del comportamento alla combustione (§5.4);
- *il calorimetro a cono*, per una valutazione quantitativa del comportamento alla combustione (§5.5);
- *il sistema SBI (Single Burning Item)*, per determinare la propagazione (intesa come velocità e flusso critico di estinzione) (§5.6);

- *la prova di piccola fiamma*, per determinare il comportamento all'ignizione dei materiali (§5.7);
- *la prova del pannello radiante*, per determinare il comportamento all'ignizione dei materiali e la velocità di diffusione delle fiamme (intesa come velocità e flusso critico di estinzione) (§5.8);

queste ultime due tipologie di test permettono la classificazione del materiale secondo la normativa italiana.

Generalizzando si possono distinguere:

- *Prova di non combustibilità*: per valutare se un prodotto può essere incombustibile o meno (§5.2).
- *Prove di reazione al fuoco*: quei prodotti che non oltrepassano la prova di non combustibilità, vengono verificati da altri standard di test per capire la capacità di ignizione e di propagazione.

I test sono molteplici.

## 5.2 Prova di non combustibilità

La metodologia di test usata al giorno oggi si basa su quanto prescritto nella UNI ISO 1182:2010. Prima della redazione di tale metodologia, il test sui materiali per verificarne la non combustibilità era normato da un altro metodo.

Le strumentazioni impiegate per entrambe le modalità di test sono le stesse: ciò che cambia riguarda alcune precisazioni sull'iter procedurale ed a quello di valutazione dei report finali.

L'alta difficoltà a superare la prova permette solamente a pochi materiali di essere definiti incombustibili.

Esistono ovviamente prodotti che non hanno problemi a passare il test di non combustibilità: un esempio tra tutti in questo senso può essere portato dai materiali isolanti che, grazie alla loro origine minerale, riescono sempre ad ottenere una certificazione in classe 0, e vengono riconosciuti, come già detto al Capitolo §3, come materiali incombustibili.

Per poter valutare la non combustibilità di un materiale, un provino del prodotto in esame di forma arrotondata e di dimensioni standardizzate viene preriscaldato per una durata complessiva di mezzora all'interno di un forno alla temperatura molto alta (Figura 5.1).



*Figura 5.1. Campione cilindrico immesso nel forno conforme alla norma UNI ISO 1182-2010*

Il prodotto da costruzione può essere classificato come non combustibile se sono soddisfatte le seguenti priorità, riportate dalla UNI ISO 1182-2010:

- Il risultato della differenza fra la temperatura massima raggiunta e la temperatura del forno, calcolata per le cinque prove, non deve superare i cinquanta gradi.
- La presenza di fiamma persistente non deve superare i venti secondi.
- La perdita di massa del prodotto testato, alla fine delle cinque tentativi, non deve superare il la metà percentuale.

Se il campione di prova riesce a concludere il test superando queste prerogative imposte, verrà stabilito che la composizione dello stesso campione è talmente ottimale da poter classificare il materiale come non combustibile.

La Figura 5.2, fornisce una illustrazione schematica<sup>8</sup> dell'impianto, che consiste essenzialmente in:

---

<sup>8</sup> l'immagine e l'elenco dei componenti sono stati presi direttamente dalla norma UNI ISO 1182-2010.

- Il fornello che viene isolato, formato da un tubo senza tappo in alto e attorniato da pannellature che emanano calore;
- un ventilatore alla base;
- una schermatura in alto;
- un alloggiamento per il provino;
- 3 termocoppie;
- un misuratore di variazione di temperatura;
- alcuni pannelli protettivi per sicurezza.

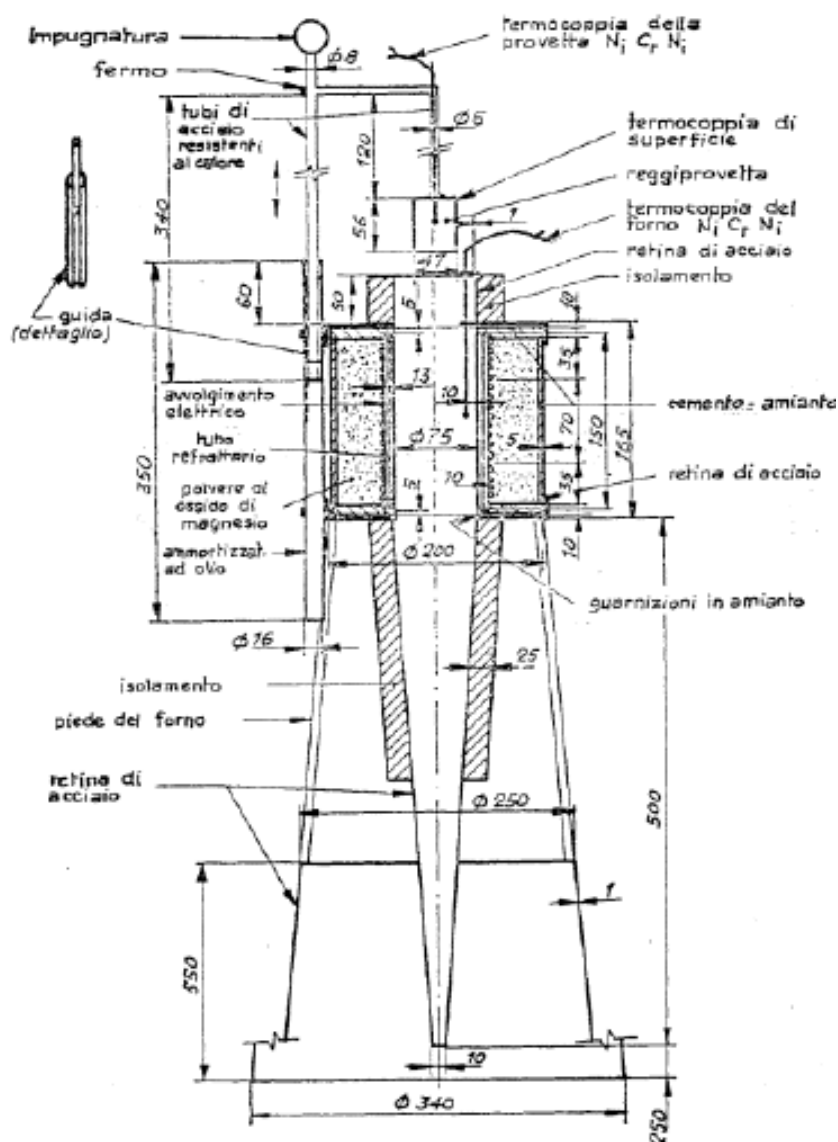


Figura 5.2. Apparecchio per prova di non combustibilità.

La UNI ISO 1182:2010 stima la capacità del prodotto da costruzione a rilasciare fiamme e una quantità di energia maggiore di una certa quantità.

### 5.3 Underwriters Laboratories 94 (UL 94)

Per verificare il grado di infiammabilità di materiali plastici, sottoposti o meno a trattamenti con ritardanti di fiamma, è stata redatta da “Underwriters Laboratories” la prova definita UL 94.

La UL 94 non detta le modalità di test di un solo metodo di prova, ma distingue al suo interno diverse prove di infiammabilità che possono interessare i prodotti, tra cui test verticali o orizzontali eseguiti mediante l’impiego di fiamma di dimensioni standard, e prove su pannellature molto larghe.

È possibile a questo punto distinguere 2 diverse tipologie di prova in grado di misurare la reazione al fuoco dei prodotti a base polimerica:

- uno caratterizza il comportamento del prodotto a far spegnere o propagare l'incendio;
- l'altro la sua capacità e facilità ad essere incendiato e ad essere segnato da elettrocuzione.

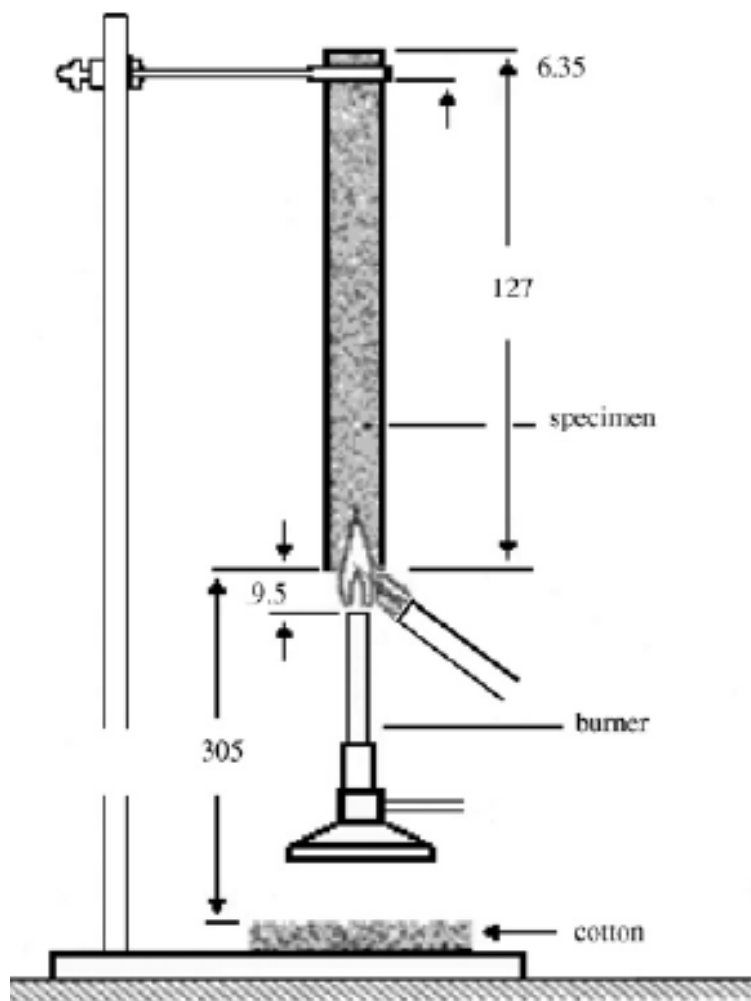
La metodologia UL 94 prevede quindi l'istituzione di sei classi in grado di poter classificare i polimerici, fondate sui risultati finali a cui si giunge al termine delle in piccola scala.

La metodologia usata più comunemente dalla comunità scientifica per la valutazione della capacità di ignizione e di propagazione dell'incendio di un materiale plastico è sicuramente il test V, eseguito su un campione messo in piedi soggetto a incendio vivo di potenza contenuta.

L'attrezzatura utilizzata nella metodologia V (di cui viene riportato uno schema rappresentativo in Figura 5.3) presenta il posizionamento di un becco a quarantacinque gradi al di sotto del campione.

La fiamma di colorazione ciano erogata ha un'estensione standard di venti millimetri, ed ha una potenza termica che raggiunge al massimo i 50W.





*Figura 5.3. Settaggio in posizione verticale, secondo la UL 94-V*

Come si evince dallo schema in Figura 5.3, il becco è posizionato sotto il provino ad una distanza di 9.5 millimetri e la fiamma viene azionata per una durata complessiva pari a dieci min e poi spenta.

I tecnici di laboratorio a questo punto prendono nota del tempo di combustione  $t_1$ , definito come il tempo trascorso il quale il provino è in grado di autoestinguerne la combustione autonomamente.

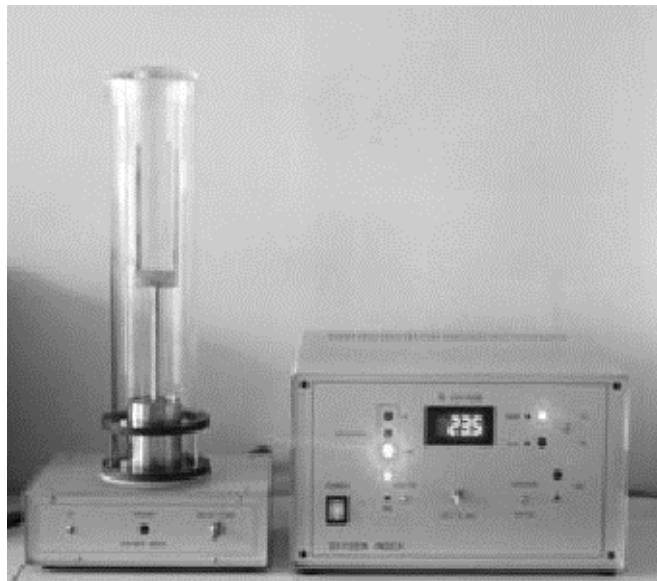
La Tabella 5.1 sottostante riassume le modalità di classificazione al fuoco secondo la UL 94-V.

*Tabella 5.1. Classificazione al fuoco secondo la 94-V*

UL 94-V0: test eseguito in posizione verticale; l'esposizione alla fiamma si interrompe entro 10 s., non sono ammessi gocciolamenti di fiamma.	t1 e t2 minori di 10 s per ogni provino t1 + t2 minori di 50 s per i cinque provini t2 + t3 minori di 30 s per ogni provino No gocciolamento
UL 94-V1: test eseguito in posizione verticale; l'esposizione alla fiamma si interrompe entro 60 s., non sono permessi gocciolamenti di fiamma	t1 e t2 minori di 30 s per ogni provino t1 + t2 minori di 250 s per i cinque provini t2 + t3 minori di 60 s per ogni provino No gocciolamento
UL 94-V2: test eseguito in posizione verticale; l'esposizione alla fiamma si interrompe entro 60 s., i gocciolamenti sono ammessi.	t1 e t2 minori di 30 s per ogni provino t1 + t2 minori di 250 s per i cinque provini t2 + t3 minori di 60 s per ogni provino Gocciolamento permesso

## 5.4 Indice di ossigeno (LOI)

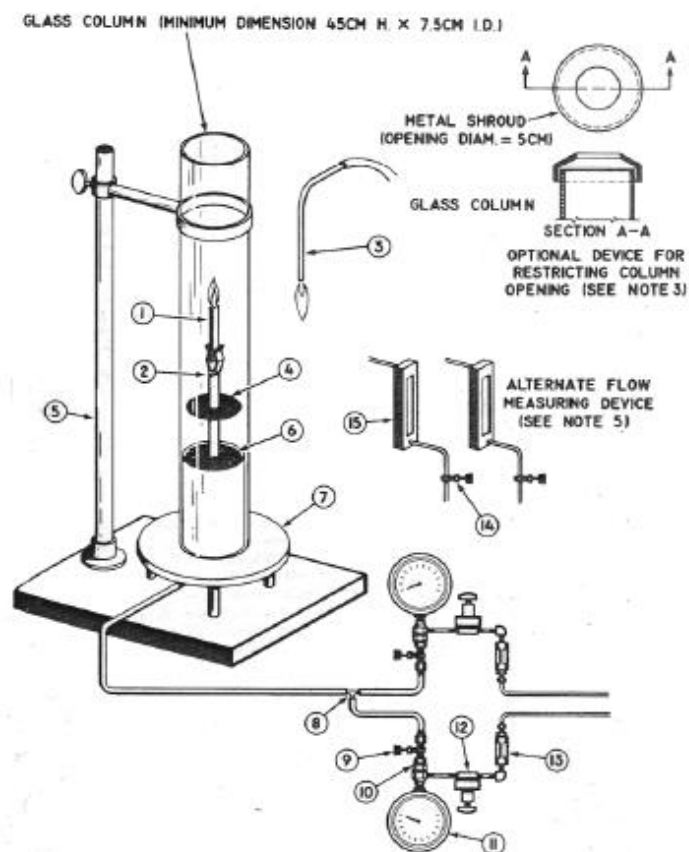
La procedura di riferimento per la prova che definisce l'Indice di ossigeno (LOI) è la norma ASTM D2863 e la referente ISO 4589-2.



*Figura 5.4. Apparato per la misura dell'indice di ossigeno*

L'indice di ossigeno, secondo la ISO 4589-2, viene indicato come la percentuale di volume della concentrazione  $O_2$  OC (OxygenConcentration) in una miscela  $O_2 + N_2$  capace di far perdurare un incendio su un campione di prodotto da costruzione in condizione a freddo.

#### **5.4.1 Descrizione dell'apparecchio di prova**



**Figura 5.5.** Schema dell'apparecchiatura per la stima dell'indice di ossigeno

L'apparato per la stima dell'indice di ossigeno è stato riportato in Figura 5.5.

Il campione viene posto in piedi (1) e agganciato al supporto dedicato ad ospitarlo (2) nella colonna.

Durante la prova il provino è innescato da una fiamma libera standardizzata (3) che genera il processo di combustione.

A questo punto il tecnico di laboratorio provvede ad azionare la valvola proporzionale del sistema elettronico per il rilascio della combinazione di prova  $O_2 + N_2$  ad una densità prefissata, ed è fatta scendere dall'estremità superiore della colonna l'ignizione; nel caso in cui il campione non innesca alcuna reazione di combustione si ricomincia il test aumentando sempre di più la densità dell'iniezione di  $O$ , fino a quando il provino si accende: come si può intendere viene variata soltanto la concentrazione di ossigeno nella miscela, mentre l'apporto di azoto rimane lo stesso.

Durante l'esecuzione della prova il tecnico valuta se è il caso di eseguire più test, e per ciascun test variare l'apporto di O<sub>2</sub> affinché il campione di prova riesca a mantenere vivo il processo di combustione.

#### **5.4.2 Riflessioni sui parametri di prova**

Lo standard definito dalla ASTM D2863 e dalla ISO 4589-2 consente di definire una classificazione in relazione alla capacità autocombustione di un prodotto da costruzione, ed è una tipologia di prova molto vantaggiosa per capire preventivamente il comportamento del materiale in questione quando esposto ad alte temperature, e di come questo partecipi alla combustione e riesca a ritardare l'innesco di una fiamma in condizioni normalizzate.

Ciò la contraddistingue quindi dalle altre metodologie di test, che alla fine non stimano una classificazione ma riportano un risultato finale di test di tipo qualitativo.

L'aspetto negativo che però comporta questo tipo di test è il fatto che il campione viene bruciato in determinate condizioni al contorno di densità di gas comburenti, e non risultano quindi troppo veritiere le informazioni rilasciate alla fine della prova sul comportamento del fuoco sul materiale in condizioni normali (in un incendio reale ad esempio). Sicuramente il metodo di valutazione dell'Indice di Ossigeno permette una stima quantitativa della capacità di innesco.

Dai test eseguiti in letteratura, un'altra importante considerazione che si riconosce è che l'indice di ossigeno di una sostanza dipende dalla temperatura dell'ambiente dove viene eseguito il test: tanto più bassa sarà la temperatura registrata nell'atmosfera attorno alla macchina di prova, tanto più alto sarà l'indice di ossigeno; questo fenomeno è spiegato dal fatto che un prodotto da costruzione è più facile ad innescarsi in condizioni di temperatura elevata.

Risultati di infiammabilità si hanno per LOI <21%. Se LOI viene registrato in percentuali più alte al 21% (percentuale di O<sub>2</sub> in atmosfera) il materiale in questione non sarà capace di auto sostenere un processo di combustione in condizioni normalizzate.

Questo concetto e le definizioni di materiali a bassa velocità di combustione e ritardanti di fiamma sono riassunti nella tabella seguente.

**Tabella 5.2.** *Classificazione dei materiali in base al LOI registrato*

Prodotti infiammabili	$\text{LOI} < 21\%$
Prodotti a bassa velocità di combustione	$21 \leq \text{LOI} \leq 26\%$
Prodotti ritardanti di fiamma	$\text{LOI} > 27\%$

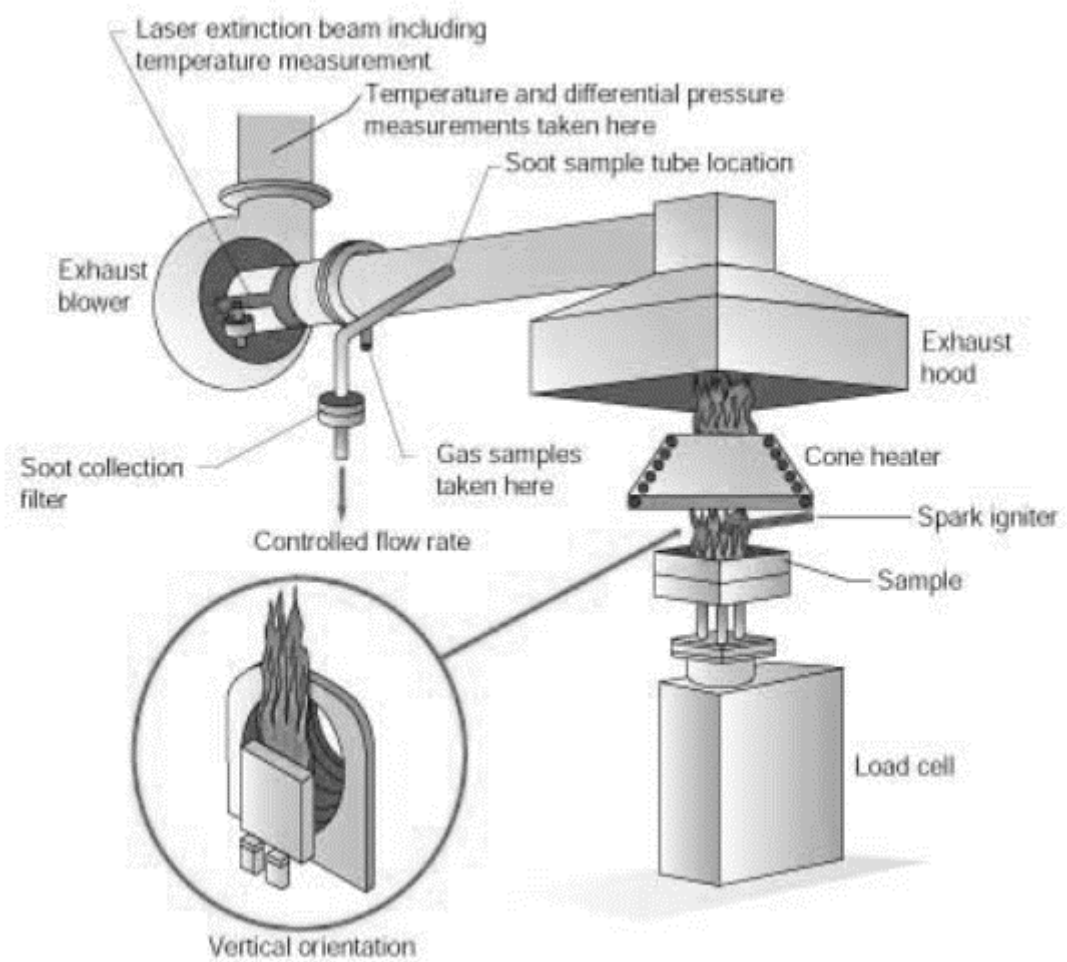
## 5.5 Calorimetro a cono

La modalità di verifica attraverso il calorimetro a cono consente di ottenere dati e report finali sulla velocità di propagazione delle fiamme, sulla composizione e sul grado di densità dei fumi rilasciati dalla combustione.

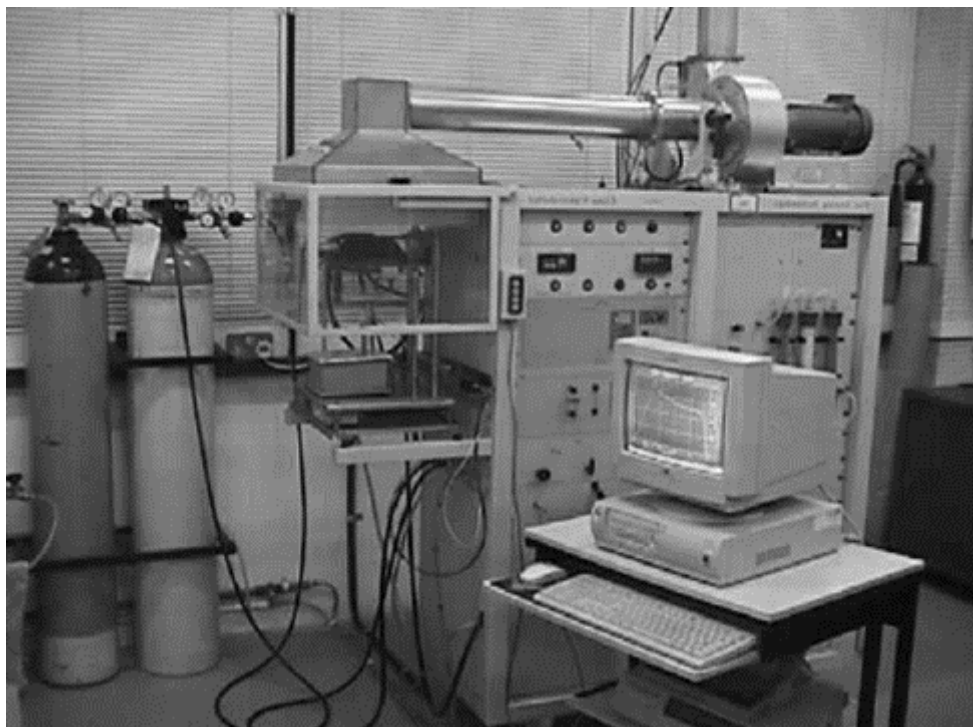
### 5.5.1 Descrizione dell'apparato di prova

In questo capitolo verranno discusse le parti dell'apparato di prova utilizzato per le prove di Calorimetro a cono.

Uno schema raffigurativo dello strumento è riportato in Figura 5.6.



**Figura 5.6.** Rappresentazione schematica del calorimetro a cono



*Figura 5.7. Esempio di un macchinario*

- *Innesco*: durante la prova con calorimetro a cono è possibile che il campione in esame rilasci fumi durante le fasi iniziali della sua combustione, capaci di accendersi autonomamente o meno.

Nel caso in cui occorra uno stimolo per l'innesco dei gas, la soluzione che viene utilizzata è la scintilla, che tra l'altro non viene influenzata dall'applicazione di eventuali ritardanti di fiamma sul campione; non viene scelta la fiamma viva poiché rilascerebbe troppa energia termica.

L'impiego di una scintilla consente inoltre di sapere esattamente quando succede l'innesco.

- *L'aspirazione dei gas di combustione*: viene utilizzato in questo senso un ventilatore connesso alla cappa di aspirazione, dove sono presenti gli strumenti per la misura della densità dei fumi e per determinarne la composizione.

La quantità di fumi aspirati supera di circa il doppio di quella minima calcolata per non avere dispersione nell'ambiente circostante.

La portata dell'aspirazione dell'aria deve essere proporzionata e ben commisurata, in quanto un'aspirazione eccessiva provocherebbe una forte diluizione dei gas di combustione e li prelevarebbe troppo velocemente.

Una aspirazione con portata volumetrica insufficiente potrebbe invece lasciar fuoriuscire i gas.



### 5.5.2 Parametri che si ricavano dalla prova

In questo paragrafo verranno presentate le variabili di prova che concorrono alla stima dei risultati nel cono calorimetro; esse sono:

- TML la massa totale persa [g].
- Peso residuo del campione [%],
- pHRR [ $\text{kW/m}^2$ ].
- HRR velocità di rilascio del calore [ $\text{kW/m}^2$ ]
- yield CO e CO<sub>2</sub>: produzione di CO e CO<sub>2</sub> [kg/kg].
- THR calore sviluppato [ $\text{MJ/m}^2$ ]
- TSR emissioni di fumo [ $\text{m}^2/\text{m}^2$ ].

### 5.5.3 Procedura di prova

Una volta sistemato lo strumento e dopo che venga effettuata la taratura in base alle caratteristiche del campione che si vuole esaminare, si posiziona il provino su un alloggio in alluminio, avente una caratteristica forma a “scodella”, cosicché i prodotti che si formano durante la combustione non abbiano la possibilità di cadere.

Il peso del provino è continuamente controllato dal piatto della bilancia posto sotto al porta-campione.

Il campione viene irraggiato dall'alto mediante una piastra in grado di assicurare l'irraggiamento costante e uniforme.

I fumi, frutto della combustione, vengono reindirizzati lungo la cappa di aspirazione, dove i vari sensori sono in grado di stimare la quantità di monossido di carbonio, anidride carbonica e di ossigeno non consumati durante il processo.

La degradazione termica del provino causa un rilascio di vapori infiammabili: appena questa miscela di gas entra in contatto con la scintilla, avviene la combustione.

## 5.6 SBI (Single Burning Item)

La normativa UNI EN 13823 (“*Prove di reazione al fuoco dei prodotti da costruzione - Prodotti da costruzione esclusi i pavimenti esposti ad un attacco termico prodotto da un singolo oggetto in combustione*”) propone il metodo di prova per stimare la reazione al fuoco dei materiali impiegati in edilizia quando sono soggetti all'esposizione di un singolo agente infuocato (da qui la definizione di SBI: Single Burning Item).

La norma menzionata all'inizio del paragrafo contiene le informazioni riguardanti la strumentazione utilizzata e la procedura da seguire per le prove Single Burning Item.

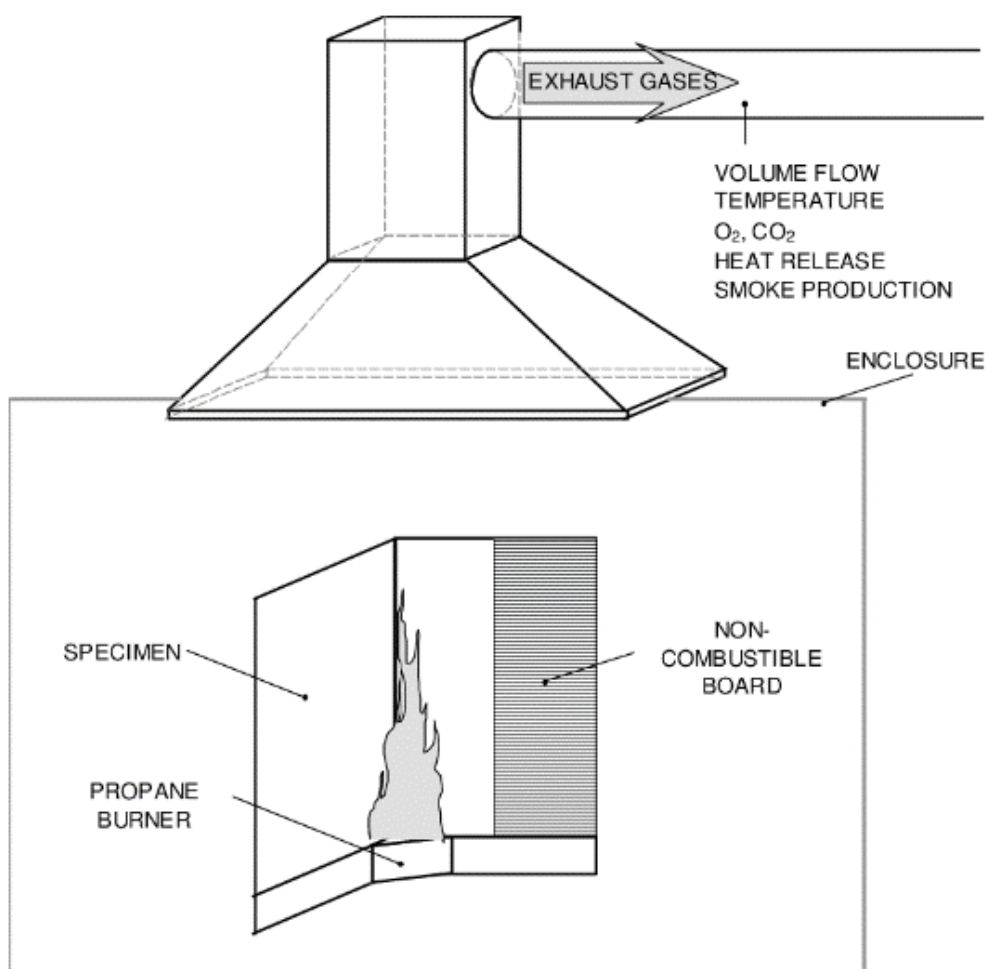
La descrizione degli strumenti utilizzati durante il test SBI è riportata nel paragrafo §5.6.1.

Tutti i parametri dipendono dai tassi di ossigeno, anidride carbonica, umidità, pressione e temperatura.

La misura della temperatura durante la prova viene effettuata nel condotto di aspirazione grazie all'impiego di appositi sensori e termocoppie.

### 5.6.1 La strumentazione di prova

Si inserisce ora uno schema della strumentazione di prova per un test (Figura 5.8), e una sua breve descrizione.

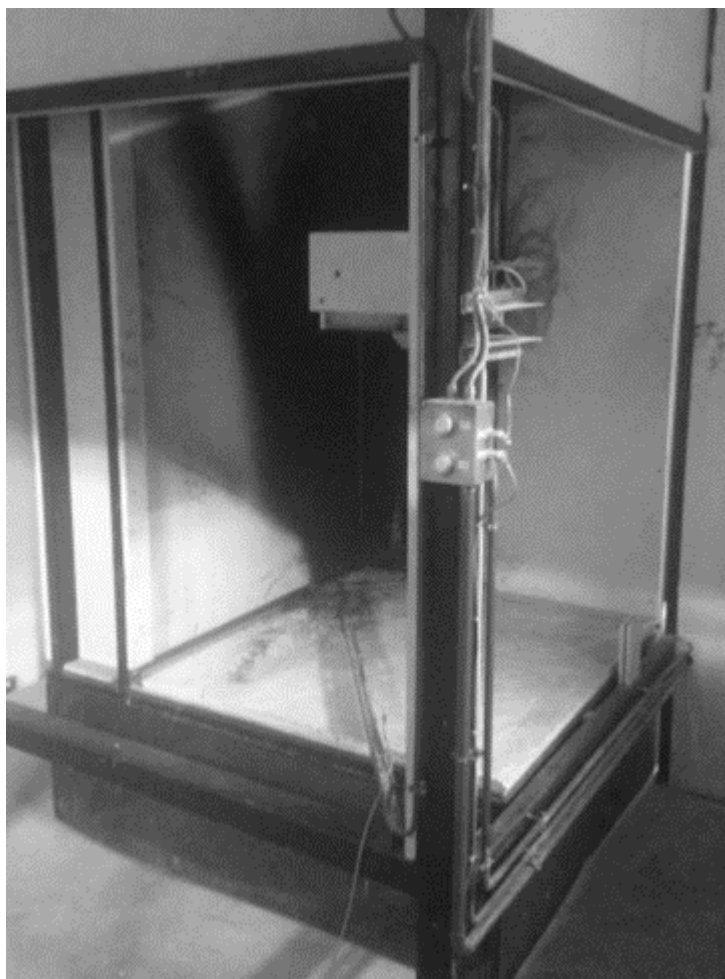


**Figura 5.8.** Schema della strumentazione necessaria per un test SBI

### 5.6.1.1 La camera

Alla base della camera c'è un carrello<sup>9</sup>, su cui è installato un piano di forma rettangolare; sotto questo piano stazionano le prese d'aria, utili durante la prova per il loro contributo alla costante iniezione di O<sub>2</sub> nella camera.

Sopra il carrello vengono installati uno di fianco all'altro due schermi isolati termicamente, e in mezzo a loro, posizionato in basso, il bruciatore; gli altri due lati del piano rimangono aperti.



*Figura 5.9. Vista reale della camera*

La camera, di cui viene riportata una foto in Figura 5.9, per scongiurare il rischio di propagazione delle fiamme in caso di incidente e per salvaguardare la sicurezza dei tecnici presenti all'esperimento, viene isolata dal resto del laboratorio da tre elementi verticali in calcestruzzo cellulare, alle quali viene applicato all'estradosso un sistema di pannellature in gesso incombustibile.

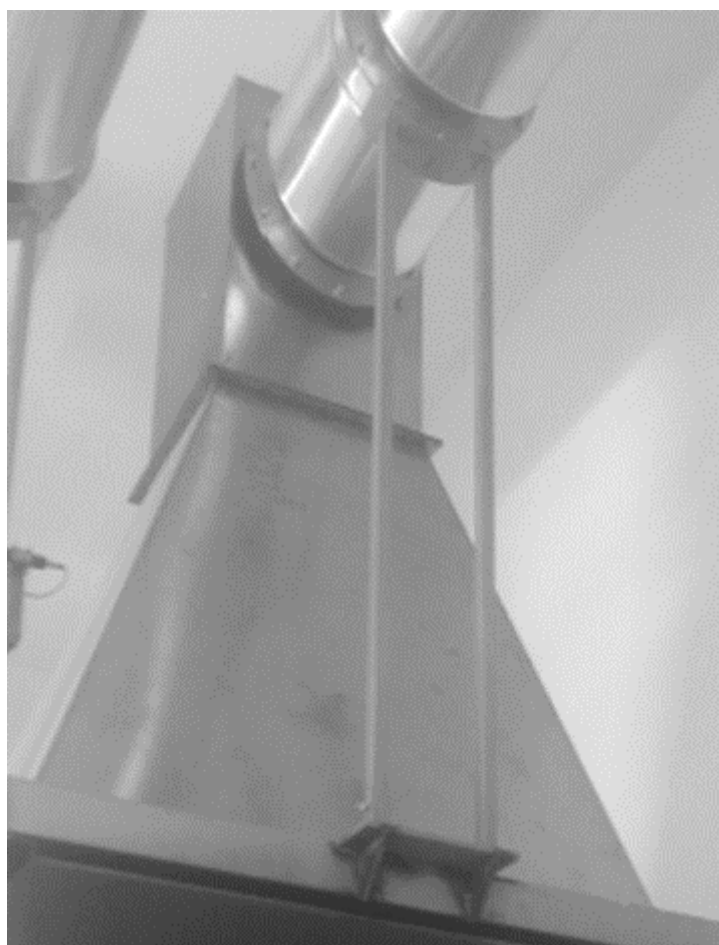
---

<sup>9</sup> Il carrello serve per riuscire a trasportare il piano fuori dalla camera, per agevolare l'installazione del campione.

Posizionata sopra la camera è presente una cappa di aspirazione, la cui fotografia è riportata in Figura 5.10. Questa condotta è collegata ad un ventilatore, che lo standard di riferimento (UNI EN 13823) fissa di essere in grado di assicurare una portata d'aria volumetrica di mezzo metro cubo al secondo.

La cappa aspira sia l'aria sia i gas combusti generati dalla combustione del gas uscente dal burner.

Come già citato prima, nella cappa vengono installate le termocoppie tarate per rilevare i cambiamenti di temperatura dei gas prodotti durante la combustione del provino.



*Figura 5.10. Cappa di aspirazione posta sopra la camera*

Durante la prova vengono registrati i parametri relativi al comportamento delle fiamme sul provino oggetto della combustione.

I tecnici di laboratorio prendono nota dei dati sulla loro diffusione, sul loro sviluppo e sull'entità dei danni della zona interessata.

Il report finale fornisce il calcolo dei parametri citati al §5.6.

### 5.6.1.2 Il bruciatore

La funzione principale del bruciatore (Figura 5.11) è quella di simulare le condizioni di incendio, rilasciando una quantità di gas propano costante per la durata della prova, cosicché venga mantenuta uguale la quantità di energia termica.



*Figura 5.11. Il bruciatore primario*

La conformazione fisica del bruciatore consente di individuarne delle aree distinte: nell'angolo posizionato sulla base del piano è localizzato il punto di sbocco per i gas a base di propano, e il resto del piano è occupato da griglie dove vengono posizionate pietre non tagliate di granulometria diversa: in basso vengono posizionati i sassi con sezione caratteristica di otto millimetri, e più superficialmente quelli con sezione minore di quattro millimetri; quest'ultimo strato, grazie ad una densità di ciottoli maggiore, permette di uniformare il flusso di calore su tutta l'estensione del bruciatore.

La fiamma che accende i gas è posizionata poco sopra il bruciatore.

### 5.6.2 Procedura del test SBI

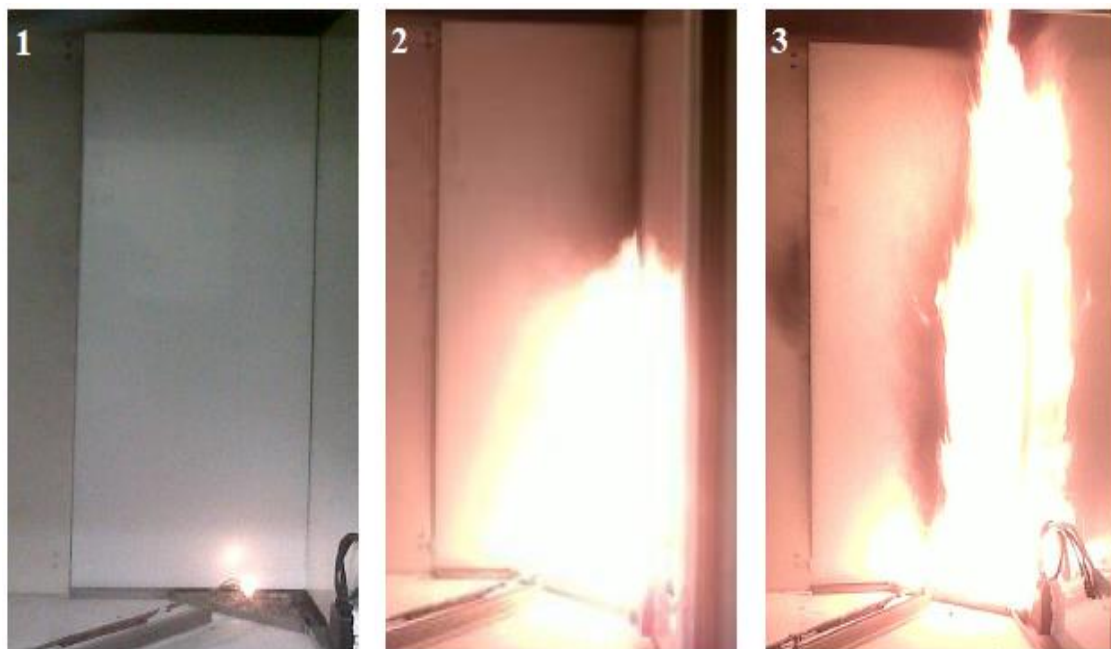
La procedura del test in questione è riportata nella norma UNI EN 13823.

Una volta installate due bombole di gas azoto e di anidride carbonica, esse vengono connesse alla strumentazione. L'operatore agisce sulle valvole di trasmissione per

regolare la pressione delle bombole a 4 (bombola contenente azoto) e a 1 bar (bombola contenente anidride carbonica).

Si possono installare e connettere alla strumentazione di prova fino un massimo di 5 bombole; in genere si preferisce il collegamento di una terza bombola contenente propano al fine di ottenere un apporto termico più uniforme.

Nel momento in cui la prova mette a rischio l'incolumità degli operatori, l'incendio non è più gestibile o le fiamme si sono diffuse troppo, è possibile interrompere l'apporto di gas da remoto.



**Figura 5.12.** (1) Inizio della prova; (2) Sviluppo della fiamma sul bruciatore; (3) Sviluppo della fiamma fino ad inizio canale convergente della cappa.

Finita la prova (Figura 5.13), si procede con lo spegnimento di qualsiasi reazione di combustione presente.



*5.13. Ciò che rimane del campione a test concluso*

Una volta fatto ciò, viene completamente svuotato dal propano non utilizzato il condotto di congiunzione; questa operazione è consentita semplicemente agendo su una valvola di regolazione.

L'iter processuale si ritiene completamente concluso quando viene dismesso il ventilatore, viene arrestato il funzionamento del sistema informatico e vengono sigillate, attraverso apposite valvole di sicurezza e membrane, le bombole contenenti azoto e anidride carbonica.

## **5.7 Piccola fiamma**

### **5.7.1 L'apparecchiatura**

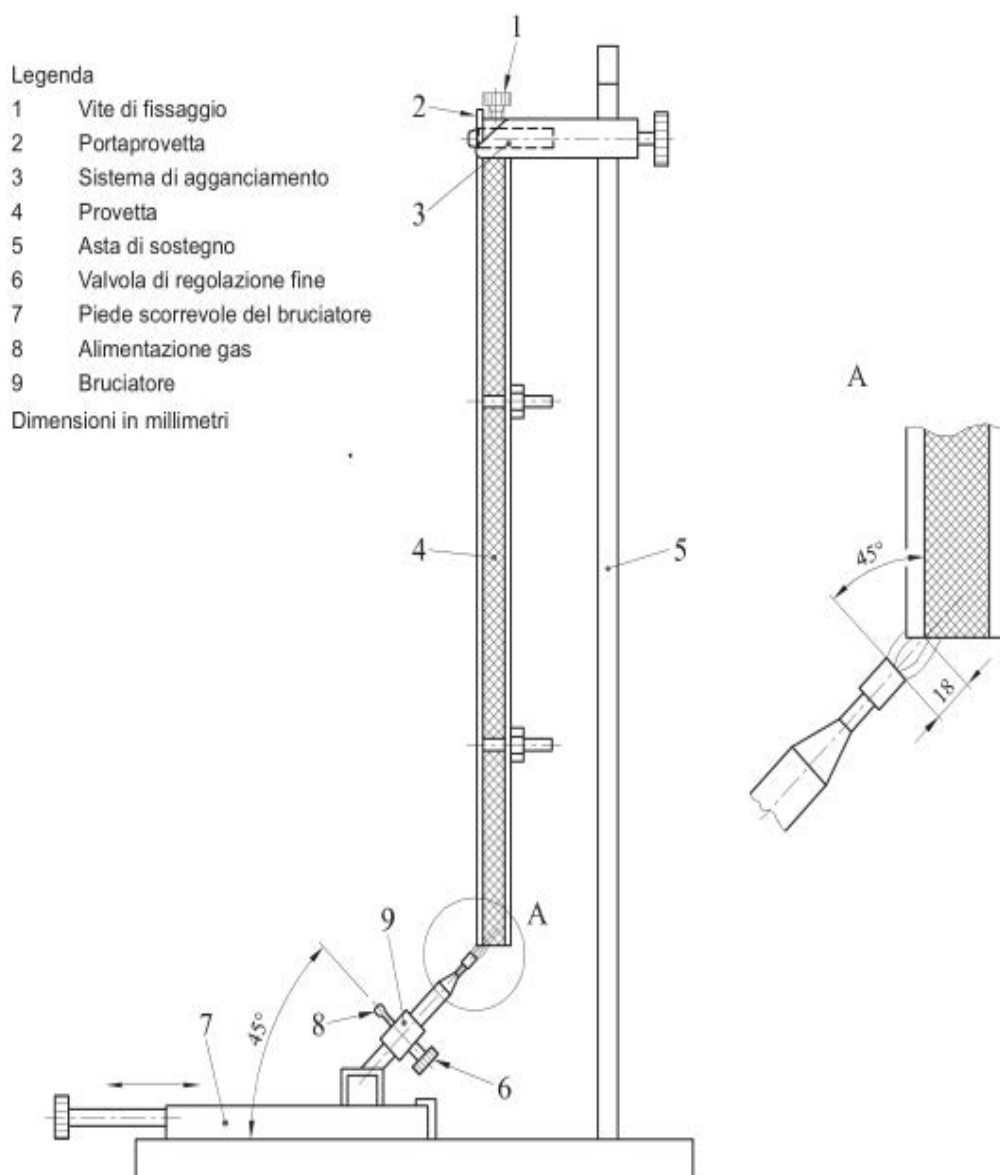
Il sistema di strumentazione mediante il quale eseguire il test è piuttosto semplice: all'interno di una camera di combustione, il provino da sottoporre a test viene installato su un apposito sistema di agganciamento, fissato su di un'asta di sostegno: alla base dell'asta prende posto il bruciatore, libero di muoversi su un piede scorrevole.

Quanto appena descritto è riportato nella Figura 5.14<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> La rappresentazione schematica riportata in figura è stata presa direttamente dalle norme di riferimento UNI 8457 e UNI 8456.

La strumentazione è quella che viene utilizzata per i due standard UNI 8457 e UNI 8456: cambia solo il sistema di accensione del campione.



**Figura 5.14.** Schema rappresentativo del supporto per la prova di Piccola fiamma secondo quanto riportato norme di riferimento UNI 8457 e UNI 8456.

#### 5.7.1.1 Provino del test

La metodologia di test su piccola fiamma vede coinvolto un provino di materiale nudo, come si presenterebbe durante il suo impiego.

Nel caso in cui il provino è destinato ad usi particolari, o se l'intento della prova è quello di verificarne il comportamento al fuoco durante una ordinaria manutenzione, esso viene sottoposto a trattamenti preliminari.



Il provino viene agganciato a un sistema che comprende un doppio telaio a U rovesciata; vincolata da questo apparato, per tutta la durata della prova la posizione del provino sarà conservata verticale.

Al campione è assegnato la classe più bassa tra quelle risultanti da due successioni di test, entrambe eseguite su cinque provini dello stesso materiale.

#### 5.7.1.2 L'innesco

Il bruciatore presente nell'apparecchio di prova ha il compito di assicurare l'accensione del provino; la posizione del bruciatore è verticale, inclinato di 45° rispetto al provino.

Il bruciatore conserva la libertà da vincoli di posizione, e può in questo modo essere spostato permettendo al tecnico di laboratorio di avvicinarlo/allontanarlo dal provino.

### **5.7.2 Parametri del test**

In questo paragrafo vengono proposti e presentati i parametri che risultano dalle prove su piccola fiamma (UNI 8457 e UNI 8456).

- *tempo di post-combustione*: è il periodo [s] che passa da quando viene tolta la fiamma di prova dal provino, a quando cessa il processo di combustione;

Questo parametro consente di assegnare un livello al provino in base alla lunghezza misurata del tempo di post-combustione:

- 1: tempo di post-combustione  $\leq 5$  s;
- 2:  $5 \text{ s} < \text{tempo di post-combustione} \leq 60$  s;
- 3: di post-combustione  $> 60$  s;

- *tempo di post-incandescenza*: è il periodo [s] che passa da quando cessa il processo di combustione, al momento in cui l'incandescenza del provino finisce definitivamente.

Questo parametro consente di assegnare un livello al provino in base alla lunghezza misurata del tempo di post-incandescenza:

- 1: tempo di post-incandescenza  $\leq 0$  s;
- 2:  $10 \text{ s} < \text{tempo di post-incandescenza} \leq 60$  s;
- 3: tempo di post-incandescenza  $> 60$  s.

- *zona danneggiata*: estensione [mm] del provino compromessa dalla combustione, che presenta danni, degradazione termica e meccanica, o punti di fusione.

Questo parametro consente di assegnare un livello al provino in base all'estensione della zona danneggiata misurata:

- 1: estensione  $\leq 150$  mm;
  - 2:  $150 \text{ mm} < \text{estensione} \leq 200$  mm;
  - 3: estensione  $> 200$  mm.
- *gocciolamento*: parametro che descrive la perdita di gocce fuse di prodotto o la produzione di particelle ardenti prima e successivamente la combustione.

Questo parametro consente di assegnare un livello al provino in base alla presenza di gocce ardenti:

- 1: gocciolamento non presente, o presente ma con gocce che smettono di ardere appena toccano il fondo della camera di combustione;
- 2: effettiva presenza di gocce ardenti, ma che smettono di ardere per un  $t < 3$  s;
- 3: effettiva presenza di gocce che ardono per un  $t > 3$  s.

Ogni livello assegnato al provino oggetto del test viene moltiplicato per relativi fattori, e ogni risultato così ottenuto viene utilizzato come addendo di una somma finale, in grado di assegnare al prodotto in questione una classe di appartenenza.

I valori risultanti dalle somme appena definite sono riportati in Tabella 5.3, dove viene indicata la relativa classe di reazione al fuoco di appartenenza, nello specifico caso di materiali utilizzati per l'impiego a parete, di interesse per questo lavoro di tesi (D.M. 10 marzo 2005).

**Tabella 5.3.** Determinazione delle classi di appartenenza di un materiale

Classificazione europea	Classificazione italiana	Somme ottenute
(A2-s1,d0), (A2-s2,d0), (A2-s3,d0), (A2-s1,d1), (A2-s2,d1), (A2-s3,d1), (B-s1,d0), (B-s2,d0), (B-s1,d1), (B-s2,d1).	Classe 1	Da 6 a 8
(A2-s1,d2), (A2-s2,d2), (A2-s3,d2), (B-s3,d0), (B-s3,d1), (B-s1,d2), (B-s2,d2), (B-s3,d2), (C-s1,d0), (C-s2,d0), (C-s1,d1), (C-s2,d1).	Classe 2	Da 9 a 12
(C-s3,d0), (C-s3,d1), (C-s1,d2), (C-s2,d2), (C-s3,d2), (D-s1,d0), (D-s2,d0), (D-s1,d1), (D-s2,d1)	Classe 3	Da 13 a 15

(D-s1,d2), (D-s2,d2) , (D-s3,d0), (D-s3,d1), (D-s3,d2), E, F.	Classe 4	Da 16 a 18
--	----------	------------

### 5.7.3 Iter di prova

Una volta posto il provino sull'apposito alloggio, si stabilizza il bruciatore.

Se la prova su piccola fiamma riguarda un provino che deve esporre al fuoco entrambe le facce (Figura 5.15), il bruciatore deve mantenere una prefissata distanza dal provino di diciotto millimetri.

Se la prova su piccola fiamma riguarda un provino che deve esporre al fuoco una sola faccia (Figura 5.16), il piede del bruciatore deve mantenere una prefissata distanza dal provino di quaranta millimetri, e la sua testa deve essere messa a metà del campione, mentre la testa a cinque millimetri.

Prima di innescare la fiamma sul bruciatore, il tecnico lo toglie momentaneamente dal provino (le regolazioni prima descritte si mantengono anche quando viene tolto il bruciatore).

Tramite apposita valvola viene abbassata/alzata l'altezza di fiamma.

Viene riposizionato il bruciatore in prossimità del provino, esponendolo a fiamma viva per:

- Dodici secondi nel caso di prova su entrambe le facce (UNI 8456);
- Trenta secondi nel caso di prova su una sola faccia (UNI 8457).

Viene annotato dal personale presente la durata del tempo di post-combustione e quella del tempo di post-incandescenza, e alla fine del test viene stimata la zona danneggiata sulla superficie del campione.

In Figura 5.15 e 5.16 sono riportate l'immagini ad indicare la modalità di esecuzione delle prove.



*Figura 5.15 Applicazione di piccola fiamma UNI 8456*



*Figura 5.16 Applicazione di piccola fiamma UNI 8457*

## 5.8 Pannello radiante

Lo standard utilizzato per un corretto impiego della prova con pannello radiante è il riferimento UNI 9174.

Secondo quanto riportato in tale norma, il test consiste nell'esame di un provino soggetto all'irraggiamento di un pannello radiante.

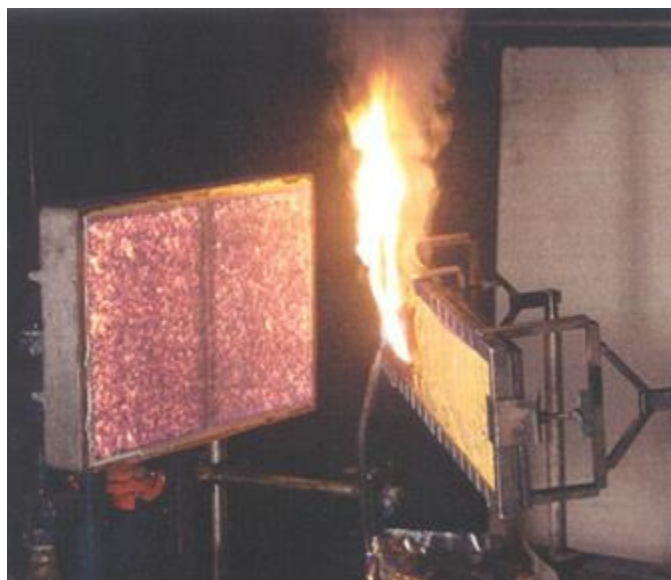
Il flusso termico che dal pannello si sprigiona in direzione del materiale di prova provoca la decomposizione termica della sua superficie e la produzione di gas di pirolisi infiammabili.

Questi gas vengono innescati da una fiamma posizionata nelle immediate prossimità del campione in prova.

Le condizioni mediante cui sarà installato il provino devono corrispondere a quelle che si prevedono essere le future modalità di utilizzo nel suo impiego reale, a seconda che esso sia esso destinato all'uso a parete, a pavimento o a soffitto.

In questo paragrafo verrà descritto nel dettaglio questo metodo di prova.

I parametri appena presentati saranno descritti nel paragrafo §5.8.2.

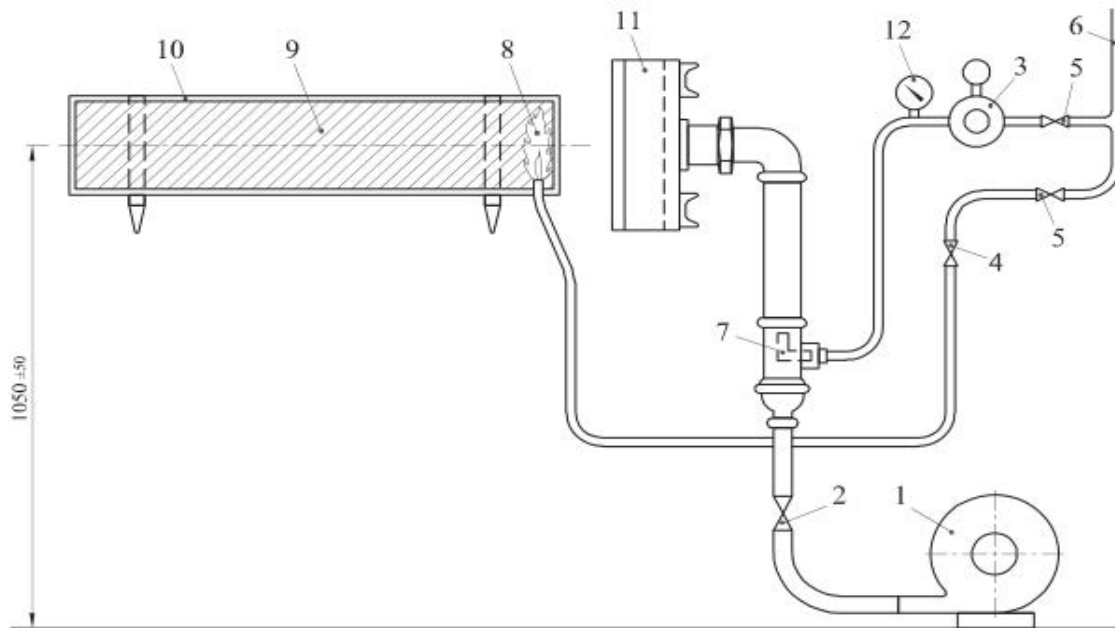


*Figura 5.17. Applicazione della prova del pannello radiante UNI 9174*

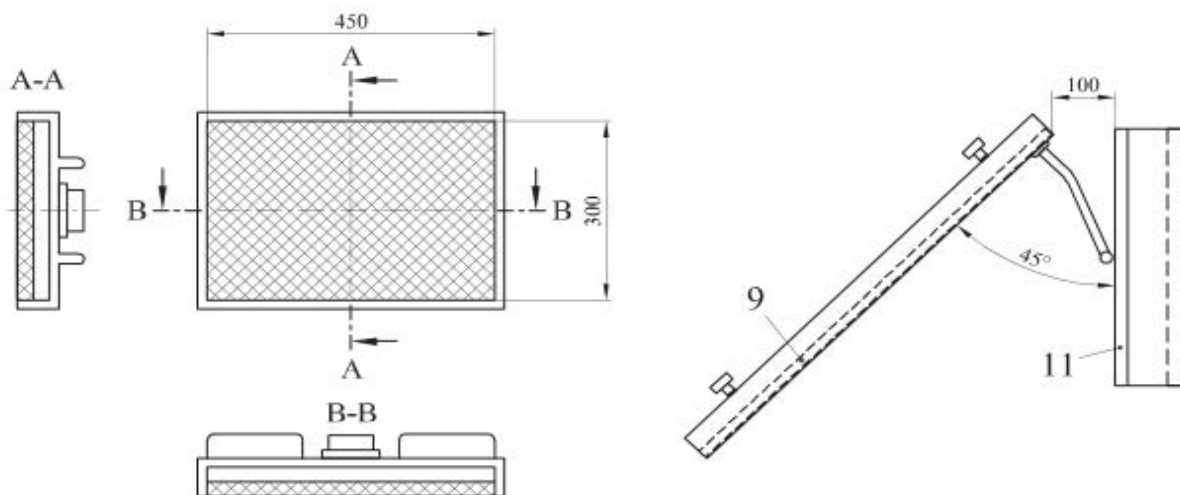
### 5.8.1 Descrizione dello strumento

Il pannello radiante consiste in una lastra di materiale poroso inalterabile e molto resistente alle alte temperature, avente un'area complessiva di dimensioni 300x450 [mm<sup>2</sup>] (Figura 5.19).

L'apparecchiatura è rappresentata nelle Figure 5.18.



**Figura 5.18.** Rappresentazione schematica del pannello radiante.



**Figura 5.19** Rappresentazione schematica del pannello radiante

I particolari numerati nelle figure 5.17 e 5.18<sup>11</sup> si riferiscono a:

- 1) ventilatore;
- 2) valvola per l'apporto d'ossigeno;
- 3) tasto per diminuire la pressione;
- 4) valvola per apporto dei gas;
- 5) valvole di chiusura;
- 6) gas
- 7) iniettore;
- 8) fiamma di prova;
- 9) campione;
- 10) alloggio campione;
- 11) pannello radiante;
- 12) Misuratore di pressione.

L'apporto di gas e di aria che sostiene l'irraggiamento dal pannello radiante avviene per mezzo dell'iniettore schematizzato nel particolare di riferimento 7 alla Figura 5.18.

La posizione mantenuta dal pannello radiante per tutta la durata della prova è verticale, e il suo spigolo più esteso deve essere quello orizzontale; esistono però casi dove il lato lungo del pannello viene posto verticalmente (dipende dalla modalità di test che si intende eseguire).

La miscela del gas propano e dell'aria deve avvenire a pressione pari a 1 atm.

È possibile utilizzare come apporto d'aria quella presente all'interno del laboratorio dove la prova viene eseguita: la raccomandazione più importante è che non venga in alcun modo alterata la diffusione della combustione durante il test.

Per motivi di sicurezza deve essere sempre attiva la valvola di non ritorno del gas propano (o GPL).

Nel seguito di questo paragrafo saranno riportate e descritte le componenti più importanti dello strumento.

#### 5.8.1.1 Provino

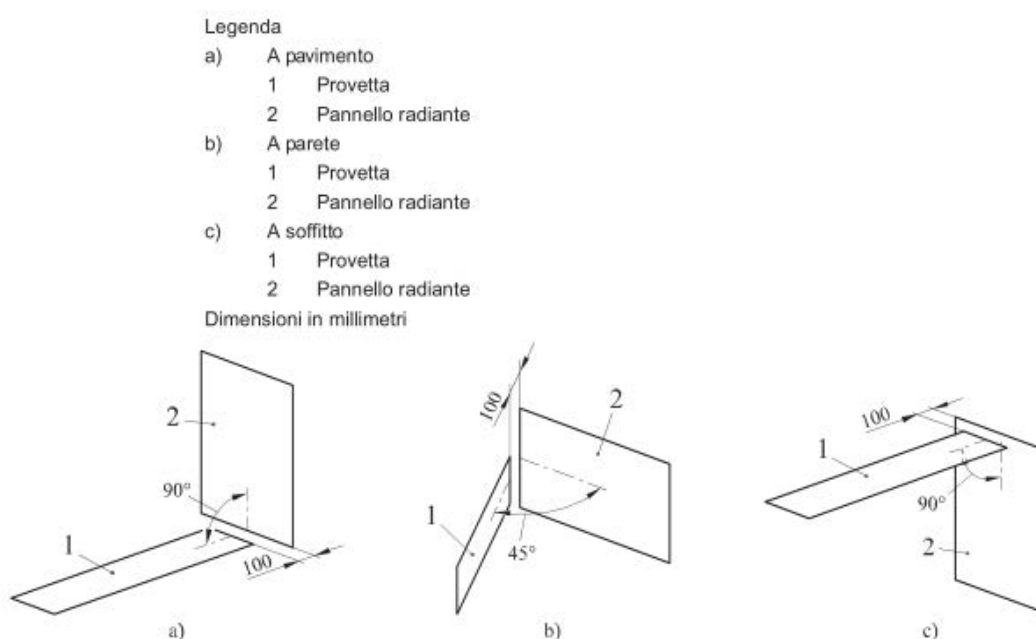
La metodologia di test su pannello radiante vede coinvolto un provino di materiale nudo, come si presenterebbe durante il suo impiego.

---

<sup>11</sup> La rappresentazione schematica del pannello e l'elenco delle sue componenti sono state prese direttamente dalla normativa di riferimento *UNI 9174*

Il campione deve essere alloggiato e fissato molto stretto in un apposito sostegno in acciaio inox, spesso 2 mm e largo quanto l'estensione del provino.

Il test viene effettuato su tre distinti provini di dimensione standard, individuata dalla normativa in 800x155 [mm] (rispettivamente lunghezza x larghezza), e, a seconda della destinazione d'uso futura del campione, le combinazioni delle posizioni del provino e del pannello radiante possono mutare; in questo senso viene riportata la Figura 20<sup>12</sup>.



**Figura 5.20** Posizione di campione e pannello radiante

### 5.8.1.2 Innesco

L'innescò della fiamma pilota avviene per mezzo del bruciatore, di dimensioni e potenza standard, presente nella strumentazione, capace di regolare l'altezza della fiamma attraverso una valvola.

A seconda delle condizioni di prova che vogliono essere verificate e della combinazione di posizione tra pannello e provino, il pannello radiante deve essere in ogni caso capace di emettere irraggiamento e radiazioni di calore concentrati sul campione, senza dispersioni, dannose per l'apparecchio e per l'incolumità dei tecnici presenti.

La fiamma pilota è in genere alimentata da gas propano.

<sup>12</sup> La rappresentazione figurante le combinazioni di posizione del campione e del pannello radiante è stata presa direttamente dalla normativa di riferimento *UNI 9174*.



La normativa UNI 9174 caratterizza la massima intensità di calore che deve provenire dal pannello radiante, e la indica in una media specificata.

#### 5.8.1.3 Laboratorio

Il laboratorio dove viene effettuato il test deve essere provvisto di un efficiente sistema di aerazione capace di un ricircolo dell'aria, per sostituire quella tolta dal sistema di eliminazione dei gas e dei fumi scaturiti dalla pirolisi.

Il laboratorio deve essere progettato e dotato di accorgimenti tali per cui i gradi di al suo interno non salgano di oltre i quindici gradi centigradi, in riferimento alla T registrata all'inizio della prova.

### **5.8.2 Parametri del test**

In questo paragrafo vengono proposti e presentati i parametri che risultano dalle prove con pannello radiante (UNI 9174).

I parametri determinabili nel caso in cui il campione permette una combustione duratura sono:

- *Velocità di propagazione della fiamma*: è la velocità [mm/min] con cui l'incendio di propaga sul campione.

Questo parametro consente di assegnare un livello al provino in base alla velocità registrata:

- 1: velocità non determinabile (la fiamma non raggiunge i 150 mm).
- 2: velocità  $\leq 30$  mm/min;
- 3: velocità  $> 30$ mm/min.

- *Tempo di post-incandescenza*: è il periodo [s] che passa da quando cessa il processo di combustione che si è propagata oltre i 300 mm, fino al momento in cui l'incandescenza del provino scompare definitivamente.

Questo parametro consente di assegnare un livello al provino in base alla lunghezza misurata del tempo di post-incandescenza:

- 1: tempo di post-incandescenza  $\leq 180$  s;
- 2:  $180$  s  $<$  tempo di post-incandescenza  $\leq 360$  s;
- 3: tempo di post-incandescenza  $> 360$  s.

- *gocciolamento*: parametro che descrive la perdita di gocce fuse di prodotto o la caduta di particelle ardenti prima e successivamente la combustione.

Questo parametro consente di assegnare un livello al provino in base alla presenza di gocce ardenti:

- 1: gocciolamento non presente, o presente ma con gocce che smettono di ardere appena toccano il fondo della camera di combustione;
- 2: effettiva presenza di gocce ardenti, ma che smettono di ardere entro 3 s;
- 3: effettiva presenza di gocce che ardono per più di 3 s.

- *zona danneggiata*: estensione [mm] della parte del provino compromessa dalla combustione, che presenta danni, degradazione termica e meccanica, o punti di fusione.

Questo parametro consente di assegnare un livello al provino in base all'estensione della zona danneggiata misurata:

- 1: estensione  $\leq 300$  mm;
- 2:  $350 \text{ mm} < \text{estensione} < 600$  mm;
- 3: estensione  $> 650$  mm.

Anche in questo caso, così come visto per la prova a piccola fiamma, ogni livello assegnato al provino oggetto del test viene moltiplicato per relativi fattori moltiplicativi, e ogni punteggio così ottenuto viene utilizzato come addendo di una somma finale, in grado di assegnare al prodotto in questione una classe di appartenenza.

I valori risultanti dalle somme sopra definite sono riportati in Tabella 5.4, dove viene indicata la relativa classe di reazione al fuoco di appartenenza, nello specifico caso di materiali utilizzati per l'impiego a parete, di interesse per questo lavoro di tesi (DM 10 marzo 2005).

**Tabella 5.4.** Determinazione delle classi di appartenenza di un materiale

Classificazione europea	Classificazione italiana	Somme ottenute
(A2-s1,d0), (A2-s2,d0), (A2-s3,d0), (A2-s1,d1), (A2-s2,d1), (A2-s3,d1), (B-s1,d0), (B-s2,d0), (B-s1,d1), (B-s2,d1).	Classe 1	Da 6 a 8

(A2-s1,d2), (A2-s2,d2), (A2-s3,d2), (B-s3,d0), (B-s3,d1), (B-s1,d2), (B-s2,d2), (B-s3,d2), (C-s1,d0), (C-s2,d0), (C-s1,d1), (C-s2,d1).	Classe 2	Da 9 a 12
(C-s3,d0), (C-s3,d1), (C-s1,d2), (C-s2,d2), (C-s3,d2), (D-s1,d0), (D-s2,d0), (D-s1,d1), (D-s2,d1)	Classe 3	Da 13 a 15
(D-s1,d2), (D-s2,d2), (D-s3,d0), (D-s3,d1), (D-s3,d2), E, F.	Classe 4	Da 16 a 18

### 5.8.3 Procedure di prova

Il test inizia quando l'operatore incaricato aziona il macchinario che aumenta la temperatura del pannello radiante.



*Figura 5.21. Fotografia riportata a titolo esemplificativo di un test di prova secondo la norma UNI 9174*

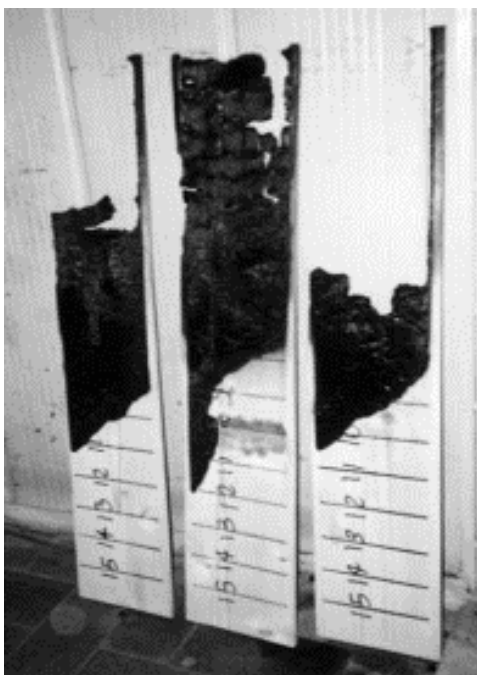
Il tecnico di prova tiene lontano da un possibile irraggiamento il campione, fin quando la radiazione di calore non raggiunge il valore di riferimento e si stabilizza; solo allora il provino viene posizionato nell'apposito alloggiamento di acciaio.

Il personale incaricato calcola il tempo da questo momento, e nel corso della prova, eventualmente, regola la fiamma pilota ad un'altezza definita, tramite apposita valvola.

Osservando la prova in corso, vengono segnati i periodi di tempo necessari affinché la combustione generata degradi il materiale, intervallando questi periodi a ogni livello di zona danneggiata successivo, a cinquanta millimetri dal precedente (figura 5.22)

In relazione al periodo di tempo impiegato, vengono stimate le velocità di propagazione medie relative a ogni livello, partendo da quello più vicino al pannello radiante; facendo una media tra queste velocità, si ottiene la velocità di propagazione della combustione.

L'estensione della zona danneggiata è pari alla distanza tra il bordo del campione più vicino al pannello radiante e il livello più lontano raggiunto dal degrado termico.



*Figura 5.22. Fotografia di un materiale sottoposto alla prova del pannello radiante, dove si vedono evidenti i livelli segnati*

Nel caso in cui vengono registrati fenomeni di gocciolamento di materiale fuso, viene misurato il tempo impiegato da queste parti incandescenti a spegnersi una volta toccato il piano d'appoggio.

Se il campione mantiene il processo di combustione per più di un'ora, bisogna spegnere il provino con un estintore e la prova è da considerarsi ovviamente terminata.

# Capitolo 6

## Riflessioni

### 6.1 Test in piccola scala e in scala reale

Lo sviluppo tecnologico nel settore delle costruzioni e l'uso di innovativi materiali da costruzione, ha evidenziato il problema della progettazione antincendio dei rivestimenti esterni degli edifici, un tempo concepiti e progettati col solo scopo garantire un'adeguata protezione dagli agenti atmosferici, oltre che un impatto estetico o architettonico per le costruzioni.

Negli ultimi anni, inoltre, le necessità, in tutte le nazioni che fanno parte dell'Unione Europea, di rispettare le politiche di risparmio energetico e di uso rinnovabile dell'energia, ha portato inevitabilmente al diffuso rifacimento degli edifici esistenti (come visto al capitolo §4).

Questi prodotti vengono classificati come prodotti da costruzione le cui disposizioni d'uso si trovano all'interno del CPR; le norme armonizzate riguardanti tali prodotti o i documenti di valutazione europea devono inevitabilmente riportare le indicazioni necessarie ai fini della loro valutazione.

L'organizzazione propose alcuni anni fa un metodo di stima della reazione al fuoco dei prodotti di costruzione, lavoro che venne poi elaborato in un Rapporto Tecnico (Technical Report N073)

L'ampio panorama normativo legato al campo delle costruzioni emanate, a livello nazionale e a livello europeo, ha sicuramente fissato i livelli minimi di qualità e di sicurezza a delle condizioni più severe, ma non sempre ha fornito le competenze adeguate a favorire la progettazione delle opere.

L'introduzione di normative molto complicate dal punto di vista applicativo, se non viene accompagnata da ricerche approfondite, manuali e guide tecniche, e corsi di formazione, ostacola inevitabilmente il processo di miglioramento della qualità opere da costruzione.

Purtroppo ad oggi non si trova ancora un metodo standardizzato per la valutazione delle prestazioni al fuoco dei materiali per le facciate; per queste ragioni è in corso una ricerca

per una armonizzazione della normativa al fine di consentire l'agevole circolazione di tali prodotti all'interno della UE, permettendo così l'impiego di un solo e credibile metodo di valutazione.

È stata diffusa la tendenza, dal punto di vista normativo, a considerare una costruzione nel suo complesso, preferendo un approccio all'intero insieme edilizio piuttosto che dei singoli componenti.

Nel panorama europeo, per quanto riguarda l'antincendio, invece, è stata sollevata la questione che le prestazioni dei sistemi di rivestimento esterni non possano essere valutati unicamente attraverso prove eseguiti in piccola scala all'interno di laboratori specializzati e certificati: per poter valutare, infatti, le condizioni per le quali si inscena il fenomeno di camino verticale durante incendi reali, le classiche prove a forno non possono essere sufficienti ed esaustive.

Riassumendo, la reazione al fuoco dei singoli componenti è in ogni modo assicurata mediante le simulazioni effettuate con le prove in piccola scala eseguite in laboratorio, ma, per la verifica dei sistemi di rivestimento da installare all'esterno di una parete di un edificio, risulta essenziale che siano verificate e valutate anche prestazioni e di diffusione del fuoco attraverso gli spazi vuoti di cui spesso è costituita la facciata stessa, prestazioni per le quali, quindi, diviene necessario l'impiego di prove in scala reale.

In questo senso, già da anni, in alcuni Stati Europei vengono preferite le prove in scala reale ai fini della valutazione del contributo alla propagazione del fuoco dei sistemi esterni di rivestimento delle facciate, isolanti e non.

Alcuni tra i paesi protagonisti di questa scelta sono Svezia, Regno Unito, Germania.

Il gran numero delle metodologie impiegate, anche se diversificate tra di loro per quel che riguarda il carico di incendio utilizzato e la strumentazione necessaria per l'esecuzione dei test, si basa sulla simulazione dello scenario di fuoco corrispondente a fiamme, oppure ad un incendio adiacente.

In definitiva, è forte l'esigenza di giungere ad una soluzione che possa prevedere un metodo di prova armonizzato a livello europeo, al fine di formulare delle classificazioni che possano rispettare le esigenze e i livelli di sicurezza imposti nei vari Stati membri dell'UE.

A questo punto la Commissione Europea sembrerebbe intenzionata a procedere proponendo due soluzioni:

- La prima è utilizzare il BS 8414-1 (completato da SP Fire 105) come il metodo europeo di valutazione su larga scala per le facciate e mantenere il metodo DIN E 4102-20 come il metodo europeo di valutazione su piccola scala.
  - La BS 8414 è una norma britannica del 2002 che descrive i metodi di prova per valutare la sicurezza antincendio del rivestimento applicato alla facciata esterna di un edificio. L'ultima versione è stata rilasciata nel 2015. In particolare, il test BS 8414-1 detta una metodologia di prova per poter definire le prestazioni antincendio dei sistemi di rivestimento esterni non portanti applicati alla facciata in muratura di un edificio. Il test valuta se un sistema di isolamento soggetto a un fuoco che fuoriesce da un'apertura (come una finestra) in una parete esterna, provocherà una diffusione del fuoco stesso all'esterno dell'edificio, nonché la probabilità che le fiamme possano penetrare nuovamente nell'edificio da un livello più alto.
  - La SP Fire 105 è una normativa svedese (emanata dallo Swedish National Testing and Research Institute SP Fire Technology) che sancisce la prova di verifica della resistenza al fuoco di pareti esterne e rivestimenti di facciata; questo metodo mira alla stima della reazione a fuoco di materiali da costruzione e di gruppi murari esterni o di rivestimenti di facciata, quando esposti al fuoco.




Viene inscenata la diffusione del fuoco sulla facciata esterna dall'interno di un compartimento, attraverso una apertura (finestra): può essere così studiato il comportamento della costruzione, del materiale, e la propagazione dell'incendio sulla parete.
  - Il metodo tedesco DIN E 4102 indaga sul comportamento al fuoco di materiali da costruzione e componenti per l'edilizia; nel particolare, la Parte 20 verifica il comportamento al fuoco del rivestimento per pareti esterne. Questo standard definisce un metodo di prova per l'individuazione e la valutazione delle prestazioni antincendio dei prodotti da costruzione e dei rivestimenti destinati ad essere utilizzati su superfici di pareti esterne degli edifici. Il rivestimento della parete esterna viene testato mediante l'utilizzo di fiamme che fuoriescono dall'apertura di una parete; è quindi esclusa l'ipotesi di incendio interno al compartimento.

Lo scopo del test è determinare il contributo del rivestimento della parete esterna alla propagazione del fuoco sulla facciata.

Il test e la valutazione vengono effettuati sull'intero sistema, comprese eventuali misure antincendio.

Le tre norme appena descritte vengono riportate nella tabella 6.1, al fine di riassumerne le principali caratteristiche.

**Tabella 6.1.** Tabella riassuntiva delle norme BS 8414-1, SP Fire 105, DIN E 4102-20.

Standard	BS 8424-1	SP Fire 105	DIN E 4102-20
Image			
Country	UK	Sweden	D
Fire Exposure	Wood crib, peak heat 3,5 MW, 4500 MJ	60 l heptane	25 kg wood/ 320 kW propane
Max heat flux on surface	70 kW/m <sup>2</sup> at 1 m height	15 or 80 kW/m <sup>2</sup>	70-95 kW/m <sup>2</sup> at 1 m height
Max temperature on surface	600°C/ 20 min	450°C/ 12 min	Not specified
Test duration	30 min	12 min	21 min gas, 30 min wood
Test specimen	Corner 2,5 m x 8 m + 1,5 m x 8 m	Flat wall 4 m x 6,7 m	Corner 3 m x 5,2 m + 2 m x 5,2 m
Substrate	Masonry or light frame	Aerated concrete	Aerated concrete

- La seconda opzione è quella di continuare il lavoro basato sul Technical Report N073 al fine di sviluppare il metodo europeo di valutazione su larga scala per prodotti per facciate (BS 8424-1 + SP Fire 105, descritti poco fa) e, come secondo metodo, mettere a punto il metodo di DIN, prediligendolo quindi come il metodo europeo di valutazione su piccola scala.
  - L'EOTA N073 Technical Report – *Large Scale Fire Performance Testing of External Wall Cladding System* è una metodologia di prova europea per



determinare la propagazione della fiamma, il contributo all'incendio e le prestazioni meccaniche dei sistemi non portanti esterni delle facciate, con o senza rivestimento isolante. Si ipotizza che l'incendio inizi il suo sviluppo o all'interno di una stanza, propagandosi attraverso un'apertura, o su una sorgente di fuoco esterno, entrambi fenomeni che espongono il rivestimento agli effetti delle fiamme e dei fumi.

La metodologia di prova appena descritta si compone di due scenari diversi, riassunti in Tabella 6.2.

*Tabella 6.2. Tabella riassuntiva della norma EOTA N073.*

<b>Standard</b>	<b>EOTA draft TR073 EXP.1</b>	<b>EOTA draft TR073 EXP.2</b>
<b>Fire Exposure</b>	30 kg Wood crib	382,5 kg Wood crib
<b>Max heat flux on surface</b>	Not specified	Not specified
<b>Max temperature on surface</b>	Not specified	Not specified
<b>Test duration</b>	60 min (30 min fire exposure)	60 min (30 min fire exposure)
<b>Test specimen</b>	Corner 2,8 m x 5,5 m + 1,5 m x 5,5 m	Corner 2,8 m x 9 m + 1,5 m x 9 m
<b>Substrate</b>	Any substrate	Any substrate

Dal momento che i metodi di prova sopramenzionati si diversificano tra di loro per esempio, per le dimensioni del campione, per i parametri osservati e per la valutazione del risultato delle prove, risulterà quindi di fondamentale importanza armonizzare la normativa europea per quanto riguarda le prove utili per testare le facciate al fine di stimarne il comportamento al fuoco.

In ogni caso, la futura normativa ed i nuovi standard che verranno proposti consentiranno di giungere ad una stima più veritiera del comportamento delle facciate al fuoco rispetto all'attuale valutazione, e arricchiranno notevolmente il quadro legislativo esistente.

### **6.1.1 Comparazione tra prove in piccola scala o in scala reale.**

Al fine di sottolineare la necessità di un nuovo apparato normativo armonizzato, verrà proposto in questo paragrafo lo studio e conclusioni di due test eseguiti sullo stesso materiale, uno su in piccola scala, e l'altro in scala reale.

L'intento è quello di fornire un'argomentazione alla teoria che, spesso, verificare le caratteristiche di resistenza al fuoco di sistemi di isolamento attraverso una valutazione in piccola scala potrebbe fornire dettagli che test in larga scala smentirebbero.

Verranno ora forniti i dettagli della prova S.B.I eseguita dall'Istituto Giordano; per motivi di privacy, l'identità dei Responsabili Tecnici di prova, i dati del produttore del provino e delle caratteristiche del pannello oggetto del test sono stati censurati: visto lo scopo di questo studio, basterà solo sapere che il campione di prova è costituito da un sistema a cappotto realizzato in Polistirene Espanso Sinterizzato (EPS).

La prova è stata eseguita secondo le prescrizioni delle norme:

- UNI EN 13823:2005 "Prove di reazione al fuoco dei prodotti da costruzione – Prodotti da costruzione esclusi i pavimenti esposti ad un attacco termico prodotto da un singolo oggetto in combustione" (si tratta della procedura di test SBI (Single Burning Item) di cui al §5.6;
- UNI EN 13238:2002 "Prove di reazione al fuoco dei prodotti di costruzione – Procedimenti di condizionamento e regole generali per la scelta dei substrati".

Nell'immagine in Figura 6.1 viene riportato il particolare del rapporto di prova in questione, che attribuisce una classe di reazione al fuoco B-s2, d0 al pannello in EPS in oggetto.

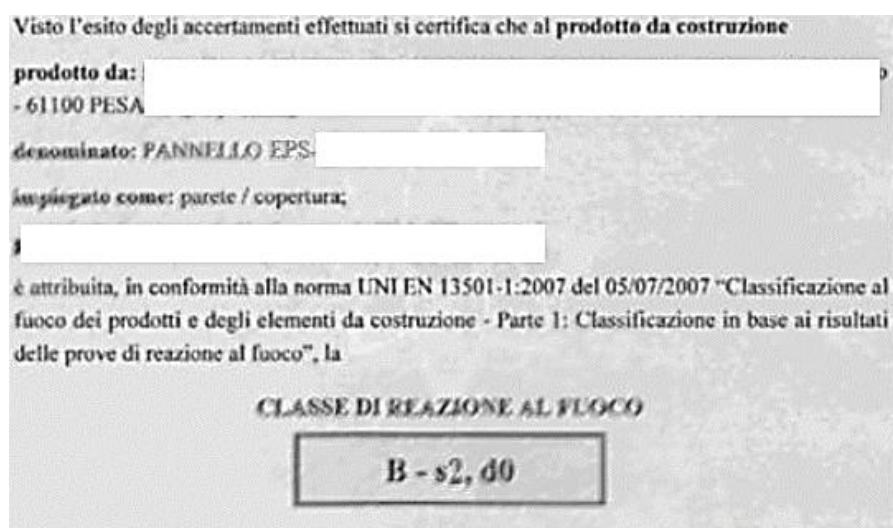


Figura 6.1. Particolare del rapporto di prova a seguito del test SBI

Ciò che si evince da questo test è la classificazione del campione in EPS come un materiale che, soggetto all'azione del fuoco, sviluppa una produzione di fumi in quantità

non eccessive (classificazione s2); per quanto riguarda il gocciolamento, non si osserva produzione di gocce o frammenti accesi nei termini previsti da UNI EN 13823. Pertanto la classificazione addizionale è d0.

Verranno ora descritte le fasi della prova in larga scala eseguita su due campioni di EPS utilizzati in un sistema a cappotto, condotta ai sensi della norma britannica BS 8414-1:2002, di cui sopra è stata riportata una breve descrizione.

I nomi degli esecutori del test, del laboratorio e della casa produttrice del sistema a cappotto in esame non verranno riportati per questione di privacy.

Il primo campione (che più avanti chiameremo Sistema di facciata 1) è costituito da materiale termoisolante in Polistirene espanso spesso centocinquanta millimetri, incollato e avvitato alla parete di prova; la classificazione in base alla reazione al fuoco del materiale, come abbiamo appena visto dal report di prova sovrastante, è B-s2, d0.

Il secondo campione (Sistema di facciata 2) è costituito da materiale termoisolante in Polistirene espanso spesso centocinquanta millimetri a cui è stata aggiunta uno schermatura antincendio di spessore pari a centocinquanta millimetri e di altezza duecento millimetri, posta immediatamente sopra l'apertura della camera di combustione. Il campione è stato incollato e fissato meccanicamente alla parete di prova; la classificazione in base alla reazione al fuoco del materiale è B-s2, d0, mentre la schermatura ignifuga viene catalogata in classe A2-s1, d0.

Dopo 15 minuti dall'inizio della prova (Figura 6.2) il Sistema di facciata 1 risulta essere completamente avvolto dal fuoco, producendo significative quantità di fumo e gas tossici, nonché gocce incandescenti che cadono sul pavimento, aumentando di fatto l'area dell'incendio.



**Figura 6.2.** Istante della prova fotografato dopo un quarto d'ora dall'inizio del test. A destra il Sistema di facciata 1, a sinistra il 2.



*Figura 6.3. Istante della prova fotografato dopo ventotto minuti dall'inizio del test.*



*Figura 6.4. Istante della prova fotografato dopo quaranta minuti dall'inizio del test.*

La situazione resta perlopiù invariata fino al minuto ventotto (Figura 6.3): il sistema di facciata 1 ha terminato il processo di combustione, consumandosi completamente. Sul sistema di facciata 2 le fiamme hanno invaso l'isolamento combustibile e una colonna di fumi tossici si alza dal campione.

La prova termina al minuto 40 (Figura 6.4): il sistema di facciata 2 continua il processo di combustione sviluppando fumi tossici (le fiamme non sono più visibili). Ciò che risulta è che lo strato di isolamento rappresentato dalla barriera antincendio posta sopra l'apertura della camera di combustione ha ritardato di 14 minuti la diffusione delle fiamme e la propagazione dei fumi tossici.

La riflessione a cui questo paragrafo vuole portare, consci di quanto emerge dai risultati ottenuti dalle due prove, consiste nella discordanza che insiste nella classificazione dell'EPS: dal test SBI (UNI EN 13823) eseguito in laboratorio in piccola scala risulta che i sistemi isolanti realizzati con Polistirene espanso possano essere classificati nella classe di reazione al fuoco B-s2, d0, come visto sopra; ciò porta a pensare ad una pannellatura che, in condizioni di incendio, impedisca di fatto il gocciolamento di parti ardenti, come ci suggerisce la classificazione aggiuntiva d0.

Questo risultato stona, però, con quanto emerso con la prova effettuata in larga scala secondo la BS 8414-1:2002, che decreta un forte gocciolamento del materiale EPS in condizioni di incendio.

Alla luce di quanto appena detto risulta inconfutabile la tesi secondo cui la prova in base alla prestazione di reazione al fuoco SBI risulti essere una metodologia di test inadeguata per i sistemi di facciata, i quali, nelle normali condizioni d'uso, sono riservati ad un impiego in situazioni ben più estese rispetto a quelle richieste dal test stesso.

Per tali ragioni, e per un'indagine più ampia e approfondita dei fenomeni che si verificano in situazioni di incendio reale, come le condizioni di camino verticale ad esempio, risulta necessario e doveroso armonizzare la normativa europea in materia di prove a cui sottoporre i materiali e i sistemi di facciata per valutare il loro comportamento al fuoco.



# Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha sottolineato l'inadeguatezza normativa alla base della stima delle prestazioni al fuoco dei materiali da costruzioni, presentando i limiti propri delle prove in piccola scala.

La negligenza e la non curanza in questo settore porta molto spesso all'utilizzo di prodotti non adatti all'impiego a cui sono destinati, generando, nel caso più estremo e impreveduto, l'insorgere di incendi incontrollabili, che, come visto nel testo, sono causa di fenomeni catastrofici in edifici di civile abitazione.

Per sensibilizzare la coscienza riguardo questa spinosa tematica, si è deciso di presentare nella tesi un intero capitolo dedicato alla descrizione di eventi distruttivi noti, sottolineando, volta per volta, come la cattiva conoscenza riguardo la reazione al fuoco dei materiali e la mancanza di una normativa antincendio di riguardo siano fattori che possono causare la distruzione di opere pubbliche e private, la tragica morte degli abitanti che popolano tali opere e la scomparsa dei servizi ad esse connesse.

Le conclusioni a cui si giunge al termine di questo lavoro evidenziano la necessità di rinnovo della normativa antincendio riguardo il metodo di prova per i materiali da costruzione, dimostrando come risultino inadeguate le prove in piccola scala per la valutazione della reazione al fuoco di tali materiali.

Per argomentare il concetto appena espresso si porta come esempio, e come già descritto nel capitolo dedicato alle riflessioni (Capitolo §6), l'inadeguatezza del metodo di laboratorio in piccola scala di prova a forno: questa tipologia di test non è, infatti, in grado di simulare condizioni di incendio reali, e non permette la verifica di resistenza del materiale in modo troppo approfondito.

Valutando un sistema di facciata con la tradizionale prova a forno, non è possibile capire se il prodotto è in grado o meno di opporsi alla creazione delle condizioni che potrebbero instaurare il disastroso effetto definito "camino verticale".

Di fatto, questa prova eseguita in laboratorio non permette di capire se, e in quali precisi casi, il sistema possa effettivamente contribuire alla determinazione dell'effetto convettivo in situazioni di incendio, e la stima fornita dai risultati finali della prova risulterebbe del tutto smentita dal comportamento del prodotto quando sottoposto all'azione distruttiva di un incendio reale.

Quindi, mentre è sempre possibile determinare in laboratorio la classe di reazione al fuoco del singolo materiale da costruzione utilizzando test di prova in piccola scala, per capire e saper descrivere l'effettivo comportamento che questi materiali assumerebbero in un sistema di facciata in condizioni di incendio reale e il ruolo protettivo isolante svolto durante il loro impiego, è necessaria la redazione di un metodo di prova in scala reale.

In questo modo sarà possibile valutare non solo la semplice reazione al fuoco del materiale, ma anche le sue prestazioni "globali", come la sua stabilità, il punto di fusione del prodotto e un eventuale gocciolamento, e potrà inoltre essere simulato il comportamento del sistema sottoposto a prova ad impedire alle fiamme di propagarsi lungo i punti di vuoto o le cavità che si trovano spesso lungo le facciate degli edifici.

Concludendo, si può dire che è evidente il bisogno in Europa della presenza di una comune metodologia di prova per la valutazione della resistenza al fuoco dei materiali, e capace di verificare ogni dettaglio comportamentale di un prodotto quando investito dalle fiamme.



# Nomenclatura

$\Delta T$	=	Aumento di temperatura (°C)
$\Delta m$	=	Perdita di massa (%)
$t_f$	=	Durata dell'incendio (s)
$PCS$	=	Potenziale calorifico superiore (MJ/kg)
$FIGRA$	=	Tasso di incremento dell'incendio (W/s)
$THR_{600s}$	=	Rilascio totale di calore (MJ)
$LFS$	=	Propagazione laterale del fuoco (mm)
$SMOGRA$	=	Tasso di incremento del fumo ( $m^2/s^2$ )
$TSP_{600s}$	=	Produzione totale di fumo ( $m^2$ )
$F_s$	=	Propagazione del fuoco (mm)
$Fr$	=	Numero di Froude (-)
$u$	=	Velocità del flusso di gas (m/s)
$D$	=	Diametro della sorgente di flusso (m)
$g$	=	Accelerazione di gravità ( $m/s^2$ )
$\rho_\infty$	=	Densità dell'aria ambiente ( $kg/m^3$ )
$m_f$	=	Flusso di massa all'interno del pennacchio di fuoco (kg/s)
$c_p$	=	Calore specifico dell'aria ambiente (kJ/kg*K)
$T_\infty$	=	Temperatura dell'aria ambiente (K)
$Q$	=	Tasso di rilascio di calore (KW)
$Z_f$	=	Altezza di fiamma (m)
$n$	=	Rapporto di forma (-)
$z$	=	Altezza dal bordo superiore dell'apertura (m)
$x$	=	Altezza dal bordo superiore dell'apertura (m)
$H''$	=	Altezza tra il piano neutro e il bordo superiore dell'apertura (m)
$A$	=	Area dell'apertura ( $m^2$ )
$HRR$	=	Velocità di rilascio del calore ( $kW/m^2$ )
$pHRR$	=	Picco della funzione HRR ( $kW/m^2$ )
$THR$	=	Calore sviluppato per unità di superficie ( $MJ/m^2$ )
$TML$	=	Massa totale persa per effetto della combustione (g)
$TSR$	=	Andamento temporale delle emissioni di fumo (-)
$SPR_{av}$	=	tasso di produzione di fumo medi per più di 60 secondi ( $m^2/s$ )
$HRR_{av}$	=	il tasso di rilascio di calore dopo 30 s (kW)

## Acronimi

$CPD$	=	Construction Products Directive
$CPR$	=	Construction Products Regulation
$UNI$	=	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
$CEN$	=	Comitato europeo di normazione
$CENELEC$	=	Comitato europeo di normazione elettrotecnica

---

<i>ETSI</i>	=	'Istituto Europeo per gli Standard nelle Telecomunicazioni
<i>D. Lgs</i>	=	Decreto legislativo
<i>D.M.</i>	=	Decreto ministeriale
<i>ISO</i>	=	International Organization for Standardization
<i>SBI</i>	=	Single Burning Item
<i>PCS</i>	=	Potere calorifico superiore
<i>PCI</i>	=	Potere calorifico inferiore
<i>U.M.</i>	=	Unità di misura
<i>FRA</i>	=	Fire Risk Assessment
<i>PUR</i>	=	Schiuma di poliuretano
<i>PIR</i>	=	Poliuretano espanso
<i>EPS</i>	=	Polistirene espanso
<i>XPS</i>	=	Polistirene estruso
<i>PE</i>	=	Polietilene
<i>GMT</i>	=	Greenwich Mean Time
<i>UL</i>	=	Underwriters laboratories
<i>LOI</i>	=	Limiting Oxygen Limit
<i>OC</i>	=	Oxygen Concentration
<i>SQT</i>	=	Self-quenching time
<i>EOTA</i>	=	European Organisation for Technical Assessment
<i>EAD</i>	=	European Assessment Document
<i>ETICS</i>	=	External Thermal Insulation Composite Systems
<i>hEN</i>	=	Harmonised European standard
<i>DIN</i>	=	Deutsche Institut für Normung (Istituto tedesco per la standardizzazione)
<i>SQT</i>	=	Self-quenching time

# Riferimenti bibliografici

- Circolare 91 del 14/09/61. Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile.
- Circolare 1968 del 15/02/08. Pareti di muratura portanti resistenti al fuoco.
- Dischi, F. (2008) Rivelazioni incendio. Rivista di Criminologia, Vittimologia e Sicurezza.
- Ministero dell'Interno, Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco (2010). Chimica e fisica dell'incendio.
- Giaccalone, C. (2016). Nuovo manuale di prevenzione incendi.
- ANIA (2010). *Lezione sull'incendio*.
- Collepari, M., Valente, M. (1978) Effetto delle alte temperature sulle proprietà dei calcestruzzi armati.
- Collepari, M., Comportamento al fuoco delle strutture in c.a., in “*Enco-journal*”.
- AIPE - Associazione Italiana Polistirolo Espanso. Il comportamento al fuoco del polistirene espanso sinterizzato (EPS).
- E. Cascioli (2015). Sviluppo di procedure di carattere analitico per definire le prestazioni antincendio dei materiali a partire da dati sperimentali secondo l'approccio della Fire Engineering. *Tesi di Laurea in Ingegneria Civile e Industriale*, Università Sapienza.
- G. Egisto. (2015). Analisi e modellazione del test SBI di reazione al fuoco di un pannello solare fotovoltaico. *Tesi di Laurea in Ingegneria Energetica*, Politecnico di Milano.
- M. Alfano. (1996). I materiali da costruzione in funzione della sicurezza antincendio. La prevenzione incendi nei locali di pubblico spettacolo. *Tesi di Laurea in Architettura*, Politecnico di Milano.
- Zambon, M. (2010). Sviluppo di espansi poliuretanic nanocompositi con migliorata reazione al fuoco. *Tesi di Laurea in Ingegneria Chimica e dei processi industriali*, DPCI, Università di Padova.
- A. Tosato (2012). Sviluppo di espansi poliuretanic da materie prime rinnovabili con migliorata reazione al fuoco. *Tesi di Laurea in Ingegneria Chimica e dei processi industriali*, DPCI, Università di Padova.
- A. De Fenzo (2011). Preparazione e caratterizzazione di sistemi epossidici con migliorate proprietà alla fiamma. *Dottorato di ricerca in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture XXIV ciclo*

- D. Modolo (2012). Influenza di antinfiamma alogenati e di argille nanostrutturate sulla stabilità termica e reazione al fuoco di sistemi polimerici a base polistirene. *Tesi di Laurea in Ingegneria Chimica e dei processi industriali*, DPCI, Università di Padova.
- Dittadi, M. (2011). Sviluppo di espansi poliuretanicici da materie prime rinnovabili. *Tesi di Laurea in Scienza e Ingegneria dei materiali*, DPCI, Università di Padova.
- Santarpia, L. (2005). Dispense del corso di “Sistemi e Impianti Antincendio”, *Facoltà di Ingegneria per l’Ambiente ed il Territorio*, Università di Roma — La Sapienza.
- Bari L. (2005). Reazione al fuoco. Le pareti Poroton® e la nuova normativa italiana. *Pubblicazione online*.
- Associazione Italiana Polistirene Espanso (2006). Il comportamento al fuoco e la classificazione dei materiali nella direttiva europea CPD 89/106. Decreti, norme e classificazione dell’EPS. *Pubblicazione online*.
- Ministero dell’Interno (1984). D.M. 26 giugno 1984. *Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione degli incendi*. Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- Stefani, A. (2005). I nuovi poliuretani. Presentato al Convegno sull’Efficienza energetica in edilizia, Venezia (Italia).
- Lorenzetti, A. (2002). Sintesi di polimeri espansi modificati: valutazione di espandenti alternativi in relazione alle caratteristiche termoisolanti e di comportamento al fuoco. Tesi di Dottorato, DPCI, Università di Padova.
- P. Monaco; “La Valutazione Della Resistenza Al Fuoco”.
- Istituto Giordano; (2014) “La Reazione Al Fuoco Dei Materiali - Euroclassi E Marcatura CE” - Seminario Tecnico Forlì – 2014.
- M. Caciolai; “Approfondimenti Sul D.M. 16 febbraio 2007 - La Valutazione Della Resistenza Al Fuoco E I Modelli Certificativi”.
- I. Mammone; “La Reazione Al Fuoco Dei Materiali”.
- L. Mazziotti; “Incendi esterni delle facciate – il rischio di propagazione”.
- C. Fiameni; “Le Normative UNI Per Il Settore Antincendio”.
- E.S. Mazzuchelli, “Facciate e sicurezza al fuoco”, Politecnico di Milano – Dip. ABC
- M. J. Rukavina, M. Carevic, I. B. Pecur; (2017) “Sicurezza antincendio delle facciate negli edifici – *Manuale per progettisti, architetti, ingegneri ed esperti di fuoco*”.
- Commissione Per La Sicurezza Delle Costruzioni In Acciaio In Caso DI Incendio “Nomogramma Calcolo Strutturale Acciaio EN 1993-1-2”.
- R. Cancedda; “La Reazione al fuoco dei materiali”, Corso di specializzazione di prevenzione Incendi, Ordine degli Ingegneri della Provincia di Nuoro.

Manzini (2015) Analisi delle situazioni di rischio incendio dei moduli FV negli edifici e metodi di prova per la verifica della sicurezza dei moduli in caso d'incendio, Politecnico di Milano. DPR n. 246 del 21 aprile 1993. Regolamento di attuazione della direttiva 89/106/CEE relativa ai prodotti da costruzione.

FireLab - Politecnico di Milano (2014) Procedura del test SBI.

Underwriters Laboratories Inc. (UL), UL 94: Test for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances.

UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI 8454:2010.

UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI 8457:2010.

UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI 9174:2010.

UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione. UNI EN ISO 1182:2010.

Unione Europea. UNI EN ISO 1716:2010.

Unione Europea. UNI EN ISO 13823:2008.

Unione Europea. UNI CEI EN ISO 13943:2004

Unione Europea. UNI EN ISO 11925-2:2010.

Unione Europea. UNI EN ISO 9239-1:2010.

Unione Europea. UNI EN 13501:2009.

Unione Europea. ISO 834-11:2014.

Unione Europea. EN 1363-1:2012.

Unione Europea. UNI EN ISO 13943:2010.

### Siti web

<https://www.infobuild.it/approfondimenti/il-comportamento-al-fuoco-delleps/> (Ultimo accesso 12/06/2019)

<https://www.teknoring.com/news/antincendio/grenfell-tower-tragedia-annunciata-riflettere-su-pannelli-e-facciate/> (Ultimo accesso 09/06/2019)

<https://www.orizzontenergia.it/efficienza-energetica-degli-edifici-e-prevenzione-incendi-un-matrimonio-difficile/> (Ultimo accesso 09/06/2019)

<http://forum.edilclima.it/viewtopic.php?f=4&t=23211&start=50&hilit=Torch+tower+Dubai> (Ultimo accesso 09/06/2019)

<http://www.dimnp.unipi.it/m.carcassi/materiale didattico/Corso%202015-16%20Prev.%20Inc./Marotta%20incendio%20torre%20Olympus%20.%2011.12.2015.pdf> (Ultimo accesso 09/06/2019)

<https://www.certifico.com/prevenzione-incendi/6472-reazione-al-fuoco-dei-materiali-quadro-normativo-it-eu> (Ultimo accesso 25/05/2019)

<http://www.coibentare.net/materiali.html> (Ultimo accesso 23/06/2019)