



POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Architettura, Urbanistica e Ingegneria delle Costruzioni

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

A.A. 2019/2020

COMPORAMENTO AL FUOCO

DI SISTEMI BIPV IN FACCIATA VENTILATA:

ANALISI, VALUTAZIONE DEL RISCHIO E SVILUPPO DI LINEE

GUIDA PROGETTUALI

RELATORE: *Prof. Ing. Angelo Lucchini*

CORRELATORE: *Prof. Ing. Enrico Sergio Mazzucchelli*

Prof. Arch. María Jesús Albarreal Nuñez

TESI DI LAUREA DI:

Mariasole Di Ciommo

919193

Sommario

Abstract.....	6
Abstract (EN)	8
1. Comportamento al fuoco delle facciate	10
1.1 Reazione al fuoco dei materiali	14
1.2 Quadro normativo	16
1.2.1 Il Codice di prevenzione incendi	18
1.3 Cenni di teoria del fuoco	20
1.3.1 L'altezza di fiamma	23
1.4 Comportamento al fuoco delle facciate a cappotto	26
1.5 Comportamento al fuoco di facciate semplici e "curtain walls"	30
1.6 Comportamento al fuoco di facciate trasparenti a doppia pelle	32
1.7 Comportamento al fuoco delle facciate ventilate	33
1.7.1 Riferimenti normativi per il rischio incendio delle facciate	40
1.7.2 Misure di protezione antincendio per facciate ventilate	64
1.7.3 Efficienza dell'intercapedine con barriere tagliafuoco	68
1.8 Esempi di grandi incendi in diversi tipi di facciata	73
1.8.1 Incendio in un edificio di appartamenti a Miskolc, Ungheria	73
1.8.2 Incendio in un Hostel di Dijon, Francia	75
1.8.3 Incendio del Centro Televisivo Culturale Di Bejing.....	75
1.8.4 Incendio di un dormitorio per studenti a Zagreb	76
2. Funzionamento dell'impianto fotovoltaico	78

3.	Comportamento al fuoco dei pannelli fotovoltaici	85
3.1	Normativa di prevenzione incendi per gli impianti fotovoltaici	87
3.1.1	Allegato alla nota prot. n. 1324 del 07 febbraio 2012	88
3.1.2	Nota prot. n. 6334 del 4 maggio 2012	91
3.1.3	Nota Prot. EM 622/867 del 18/02/2011.....	95
3.1.4	Nota DCPREV prt. N. 11152 del 9/8/2011	98
3.2	Materiali	99
3.3	Comportamento elettrico	104
3.3.1	Arco voltaico	111
3.3.2	Arco elettrico nei generatori fotovoltaici.....	113
3.3.3	Hot Spot	114
3.3.4	Pericolo di elettrocuzione.....	116
3.3.5	Inneschi nelle “string boxes”	118
3.4	Test.....	119
3.4.1	Prova di reazione al fuoco	120
3.4.2	Prova al cono calorimetrico	127
3.4.3	Test del modulo FV nel suo insieme	129
3.4.4	Test del comportamento di vetro e incapsulante	131
4.	Confronto fra FV in copertura e in facciata	133
5.	BIPV in facciate ventilate.....	135
5.1	Premessa	135
5.2	BIPV - Building Integrated Photovoltaic	136

5.3	Confronto fra BIPV e moduli FV tradizionali	142
5.4	Test riguardanti la sicurezza al fuoco sui BIPV	146
5.5	Prodotti BIPV	150
5.6	BIPV sull’involucro degli edifici.....	151
5.6.1	BIPV in facciata ventilata	152
5.6.2	BIPV in facciata trasparente	155
5.6.3	“Adaptive Solar Facade”: pannelli FV in sistema di oscuramento	156
5.7	Comportamento al fuoco dei sistemi BIPV in facciata	158
5.7.1	Facciate BIPV dotate di sistemi RSS	161
5.7.2	Facciate BIPV a doppia pelle	174
6.	Valutazione del rischio di incendio	176
6.1	Premessa	176
6.2	Il rischio di incendio	179
6.3	Analisi del rischio di incendio	180
6.4	La valutazione del rischio di incendio	181
6.4.1	Il metodo semi-quantitativo	185
6.5	Parametri influenti sul rischio di incendio	188
6.5.1	Analisi degli scenari di incendio di una facciata.....	189
6.5.2	Analisi dei principi generali di prevenzione incendi.....	194
6.5.3	Analisi dei parametri relativi al sistema di facciata	199
6.5.4	Aggravio del rischio di incendio per presenza di impianto FV	201
7.	Misure di prevenzione antincendio in facciate BIPV.....	208

7.1 Misure relative alla compartimentazione dell'edificio	208
7.2 Misure relative alla scelta dei materiali di facciata	211
7.3 Misure relative alla sicurezza antincendio di facciate ventilate	213
7.4 Misure relative alla sicurezza antincendio degli impianti FV in facciata .	216
7.5 Linee guida per edifici con facciate ventilate BIPV	218
7.6 Indicazioni per edifici di categoria superiore alla A.....	242
Conclusioni.....	245
Indice delle figure.....	247
Riferimenti bibliografici	256
Ringraziamenti	260

Abstract

In questo elaborato di tesi viene trattato il rischio di incendio in edifici che presentano un sistema costruttivo di facciata ventilata con rivestimento in moduli fotovoltaici integrati nell'involucro, detti elementi BIPV – “Building Integrated Photovoltaic”.

Si è analizzato il comportamento al fuoco delle varie tipologie di facciata, facendo riferimento al quadro normativo italiano e alla reazione al fuoco dei vari materiali, per poi soffermarsi principalmente sulle facciate ventilate, facendo un'analisi dello stato dell'arte e dei riferimenti normativi specifici di diversi Paesi. Di conseguenza, vengono presentate metodologie di approccio utilizzate, ad oggi, per garantire la sicurezza al fuoco di questo tipo di edifici, specialmente per ciò che riguarda l'intercapedine ventilata ed il cosiddetto “effetto camino”, e come quindi andare a risolvere questi aspetti.

Viene poi riportato e discusso il comportamento al fuoco dell'impianto fotovoltaico convenzionale, analizzando, anche qui, il quadro normativo italiano e le varie tipologie di test; a questo proposito, è bene specificare che i pannelli FV possono essere sia causa di incendio, che esservi semplicemente coinvolti, per questo motivo vengono trattati i vari materiali costituenti ed il funzionamento elettrico dell'impianto, in modo tale da comprenderne a pieno i rischi.

Dal funzionamento del sistema fotovoltaico tradizionale, solitamente posizionato in copertura, si passa all'utilizzo di sistemi BIPV integrati nell'involucro dell'edificio, che vengono analizzati complessivamente, per poi descriverne le applicazioni in vari scenari ed il rispettivo comportamento in caso di incendio.

Dopo aver trattato il processo di valutazione del rischio di incendio, vengono elencate una serie di misure di prevenzione antincendio relative ai vari aspetti di una costruzione, andando infine a stipulare delle linee guida, utili ai progettisti, specifiche per un ipotetico edificio con sistema costruttivo di facciata ventilata con rivestimento in moduli BIPV, in modo tale da garantirne la sicurezza al fuoco.

Questo lavoro di tesi è stato sviluppato in collaborazione con la Universidad de Sevilla – Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, in seguito ad un progetto di Erasmus + svolto durante l'anno accademico 2019/2020, per poter approfondire alcuni aspetti da un punto di vista multidisciplinare.

Abstract (EN)

This thesis work deals with the fire risk in buildings which have a ventilated façade construction system with building integrated photovoltaic (BIPV) modules as the cladding of the envelope.

The fire behavior of different types of facades was analyzed, referring to the Italian regulatory framework and the reaction to fire of the various materials, and then focusing mainly on ventilated facades, taking a closer look at the state of the art and specific regulatory references from different countries. Consequently, approach methods are presented, used, nowadays, to ensure the fire safety of this type of buildings, especially as regards the ventilated cavity and the so-called “chimney effect”, and how to solve this aspect.

The fire behavior of the conventional photovoltaic system is then reported and discussed, again analyzing the Italian regulatory framework and the different types of tests; in this regard, it is worth specifying that the PV panels can be both a cause of fire and simply be involved in it, for this reason the various constituent materials and the electrical operation of the system are treated, in such a way that it is possible to properly understand the risks.

From the operation of the traditional PV system, usually positioned on the roof, we move on to the use of BIPV elements, integrated in the building envelope, which are analyzed altogether, and then the applications in different situations and the respective behavior in case of fire are described.

After having dealt with the fire risk assessment process, a series of fire prevention measures, relating to the various aspects of a building, are listed, finally going to stipulate guidelines, useful for designers, specific for a

hypothetical building with a ventilated façade with BIPV module cladding, in such a way as to guarantee fire safety.

This thesis work was developed in collaboration with the Universidad de Sevilla - Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, following an Erasmus + Project during the academic year 2019/2020, to deepen some aspects from a multidisciplinary point of view.

1. Comportamento al fuoco delle facciate

La “fire performance” di un edificio viene senza dubbio influenzata dalla tipologia di involucro presente e da come il sistema costruttivo di facciata si comporta in situazioni di emergenza in caso di incendio. Questo dipende certamente dal tipo di scenario di sviluppo e diffusione delle fiamme e dai materiali utilizzati nelle varie tipologie di facciate costruttive, per ognuna delle quali, sono previste specifiche misure di prevenzione antincendio, sia attive che passive.

In generale, quando si parla di “Sicurezza antincendio” di spazi costruiti, al fine di esser rispettata, bisogna assicurarsi che essi vengano progettati ed eseguiti in modo tale che, in caso di incendio, vengano soddisfatti i seguenti obiettivi:

- Mantenere la capacità portante della costruzione per un determinato periodo di tempo;
- Limitare la produzione e propagazione delle fiamme e del fuoco all’interno della costruzione;
- Limitare la diffusione dell’incendio alle costruzioni vicine;
- Intervenire per l’evacuazione e il salvataggio delle persone che si ritrovano all’interno della costruzione;
- Assicurare la sicurezza delle squadre di soccorso.

Prima di analizzare il comportamento al fuoco di sistemi di facciata che integrano impianti fotovoltaici, è il caso di trattare singolarmente le facciate degli edifici; difatti, i principali problemi relativi alla loro sicurezza al fuoco riguardano i seguenti aspetti:

- molto spesso, gli elementi resistenti al fuoco non garantiscono, una volta che si presenta un incendio in facciata, che venga evitata la propagazione del fuoco da un compartimento all'altro dell'edificio;
- negli edifici con facciate ventilate (ventilazione naturale o forzata), il rischio della diffusione dell'incendio ad altre zone di essi è molto alto;
- i materiali e componenti che costituiscono la facciata o il rivestimento esterno dell'edificio, se combustibili, possono facilmente propagare l'incendio;
- spesso è molto difficile per i vigili del fuoco o personale di soccorso portare a termine le operazioni di salvataggio e di estinzione delle fiamme lungo la facciata, soprattutto in caso di edifici con altezze elevate;
- per un osservatore esterno, è piuttosto complesso, soprattutto in caso di facciate a doppia pelle, individuare la presenza di un incendio;
- in caso di incendio, il collasso finale della facciata o di una sua parte (pannelli, profili, vetri) può essere una fonte di pericolo nei confronti dell'esodo degli occupanti e dei soccorritori.

Complessivamente, vi sono tre differenti meccanismi di propagazione di un incendio in facciata:

1. Diffusione attraverso il gap che si trova tra il solaio orizzontale e il lato interno della facciata (detto "filo facciata");
2. Diffusione lungo la camera di ventilazione della facciata;
3. Diffusione mediante le aperture di facciata.

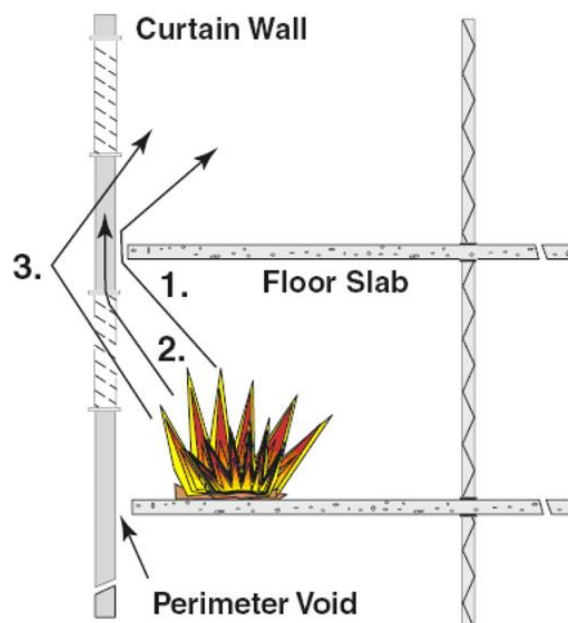


Figura 1 – Differenti meccanismi di propagazione di un incendio in facciata.

Come diretta conseguenza di un incendio, quindi, bisogna anche considerare il rischio legato alla caduta di componenti o parti della facciata che potrebbero collassare durante l'esposizione al fuoco, soprattutto di parti fragili come gli elementi di vetro.

Tra i fattori principali caratterizzanti la propagazione di un incendio in facciata vi sono pertanto:

- Proprietà di reazione al fuoco dei materiali costituenti la soluzione di facciata, che influenzano la velocità di diffusione dell'incendio attraverso l'involucro;
- Presenza di intercapedini, che possono essere proprie della soluzione di facciata o che si vengono a creare a causa della delaminazione di alcuni strati durante l'incendio stesso. In particolare, se una fiamma entra in una intercapedine, essa può estendersi da cinque a dieci volte la sua lunghezza iniziale a causa del cosiddetto "effetto camino", indipendentemente dalle proprietà dei materiali che costituiscono l'intercapedine stessa. Se non si utilizzano apposite barriere tagliafuoco, questo effetto può essere causa

di una più veloce e rapida diffusione verticale dell'incendio, inizialmente non direttamente visibile in quanto "nascosta" all'interno dell'intercapedine dal rivestimento di finitura;

- Presenza di aperture della facciata (finestre, porte, etc.) che consentono alle fiamme di entrare e/o di uscire dall'edificio in più punti.

I prodotti da costruzione rappresentano, a seconda della loro performance al fuoco, uno dei fattori determinanti per:

- Valutare lo sviluppo di un incendio in una stanza, compreso il rilascio di fumo, la diffusione di fiamme e fumo all'interno dell'edificio e verso gli edifici adiacenti;
- Valutare le prestazioni al fuoco della costruzione e stabilire delle regole progettuali per le diverse parti di essa, rilevanti per la sicurezza antincendio.

Il raggiungimento delle performance necessarie a migliorare l'efficienza energetica degli edifici, nel rispetto delle normative attuali, come ad esempio l'utilizzo di isolanti termici e l'integrazione di impianti per l'autoproduzione di energia, può influenzarne anche il comportamento specifico in caso di incendio. A questo proposito, negli ultimi anni gli spessori degli isolanti termici sono più che raddoppiati e, soprattutto nel caso di impiego di materiali combustibili, sono inevitabilmente cresciuti anche i rispettivi carichi di incendio. Sono di conseguenza aumentate le durate sia del potenziale incendio, sia del suo spegnimento, fattori che possono incrementare il rischio di propagazione del fuoco sulle facciate dell'edificio, così come verso il suo interno e/o verso costruzioni limitrofe.

Bisogna, a tal proposito, considerare alcuni aspetti specifici:

- Presenza di materiali facilmente combustibili in facciata;
- Assenza di ostacoli alla propagazione dell'incendio in facciata e/o verso facciate limitrofe;
- Presenza di caratteristiche geometriche e di ventilazione nella facciata che favoriscono lo sviluppo dell'incendio e la sua propagazione verso l'alto, come anche in direzione orizzontale;
- Possibilità di distacco di porzioni di facciata incendiate e coinvolgimento di porzioni di facciata ancora integre.

1.1 Reazione al fuoco dei materiali

Prima di analizzare i differenti comportamenti al fuoco delle varie tipologie di facciata, è necessario fare una distinzione fra resistenza al fuoco e reazione al fuoco.

Negli Eurocodici, la resistenza al fuoco è descritta come la capacità di una struttura di svolgere le sue funzioni, per una certa esposizione al fuoco e un certo periodo di tempo. La resistenza al fuoco dei componenti e sistemi costruttivi di un edificio viene classificata tramite differenti classi o combinazioni di esse; le diverse classi di resistenza al fuoco specificano diversi criteri di performance. La classificazione di resistenza al fuoco contiene un tempo limite in minuti (ad esempio 30, 60, 90, 120), che indica il tempo durante un incendio in cui la costruzione può: conservare le sue caratteristiche meccaniche (R – capacità portante), evitare la diffusione di fiamme, gas di combustione, gas infiammabili e fumo verso la parte dell'edificio non colpita (E – integrità) e prevenire l'aumento della temperatura sulle superfici non esposte al fuoco (I – isolamento).

La reazione al fuoco indica invece il modo in cui il materiale si comporta come combustibile. La combustibilità corrisponde alla quantità di calore emessa in caso di combustione assoluta del materiale. L'infiammabilità, invece, corrisponde alla quantità di più o meno gas infiammabili prodotti dal materiale sotto l'azione di una fonte di calore. Si ha una classificazione dell'Euroclasse (A1, A2, B, C, D, E e F) riconosciuta in tutta l'Unione Europea; inoltre, si tiene in considerazione lo sviluppo del fumo (S di "smoke": s1, s2 e s3) e le potenziali particelle incandescenti proiettate (D di "droplets": d0, d1, d2 e d3).

Combinando le prestazioni indicate è possibile ottenere in tutto 40 differenti classi che definiscono la reazione al fuoco dei materiali.

Euroclasse	Reazione al fuoco del materiale
A1	Materiale - prodotto incombustibile
A2	
B	Materiale - prodotto di combustibilità limitata
C	Materiale - prodotto che brucia nel periodo da 10 a 20 minuti
D	Materiale - prodotto che brucia nel periodo da 2 a 10 minuti
E	Materiale - prodotto che brucia nel periodo di 2 minuti
F	Materiale - prodotto che non rientra nelle classi precedenti. Si tratta generalmente di materiale facilmente infiammabile.

Figura 2 - Euroclassi di reazione al fuoco.

S1	Piccola quantità di fumo ammessa
S2	Produzione di fumo limitata ma crescente
S3	Quantità di fumo elevata

Figura 3 - Classificazione aggiuntiva in relazione alla produzione di fumo.

d0	Rilascio di gocce/particelle ardenti non ammesso
d1	Rilascio di limitate quantità di gocce/particelle ardenti
d2	Produzione di gocce/particelle ardenti elevata

Figura 4 - Classificazione aggiuntiva in relazione alla formazione di gocce/particelle ardenti.

1.2 Quadro normativo

Lo scopo generale della legislazione riguardante la sicurezza antincendio è quello di stabilire i requisiti per le strutture (capacità portante), i materiali da costruzione, per prevenire gli incendi e limitare la propagazione del fuoco e delle sue dimensioni, e le modalità di evacuazione degli edifici, compresa la prevenzione della propagazione dell'incendio ad altri edifici vicini, in modo tale da definire come tali aspetti dovrebbero esser progettati ed eseguiti.

Le regole di progettazione strutturale, comprese quelle che riguardano gli incendi, sono stabilite dagli Eurocodici, in vigore nei territori dei paesi membri dell'UE. Lo scopo del programma Eurocodice, avviato dalla Commissione Europea, è di stabilire un insieme armonizzato di regole tecniche per la progettazione di edifici e opere di ingegneria civile.

In Italia, specifiche indicazioni sulla sicurezza antincendio delle facciate di edifici civili sono fornite dalla Guida tecnica n. 5043 "Guida per la determinazione dei requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili", documento volontario applicabile a edifici civili con altezza antincendio superiore ai 12 metri. Allo stesso modo, anche il D.M. 16/5/1985 n. 246 e il Decreto 25 Gennaio 2019 hanno per oggetto i criteri di sicurezza antincendio da applicare agli edifici destinati a civile abitazione, con altezza antincendio uguale o superiore a 12 m.

Tali norme presentano i seguenti obiettivi:

- a. Limitare la probabilità di propagazione di un incendio originato all'interno dell'edificio, a causa di fiamme o fumi caldi che fuoriescono da vani, aperture, cavità verticali della facciata, eventuali interstizi tra la testa del solaio e la facciata, o tra la testa di una parete di separazione antincendio e la facciata, con conseguente coinvolgimento di altri compartimenti, sia

che essi si sviluppino in senso orizzontale che verticale, all'interno della costruzione e inizialmente non interessati dall'incendio;

- b. Limitare la probabilità di incendio di una facciata e la sua successiva propagazione, a causa di un fuoco avente origine esterna, come nel caso di un incendio sviluppatosi in un edificio adiacente oppure a livello stradale o alla base dell'edificio;
- c. Evitare o limitare, in caso di incendio, la caduta di parti di facciata (frammenti di vetri o di altre parti comunque disgregate o incendiate) che possono compromettere l'esodo in sicurezza degli occupanti l'edificio e l'intervento delle squadre di soccorso.

Per quanto riguarda le norme generali di prevenzione incendi, il D.M. 3 agosto 2015, conosciuto come "Codice di prevenzione incendi", ha rappresentato una rivoluzione: con questo Decreto, il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, ha colmato il gap normativo con l'Europa.

Relativamente alle norme specifiche che riguardano il rischio incendio delle facciate, in Italia è quindi presente la già citata Guida Tecnica "Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili", emanata attraverso Lettera Circolare del Ministero dell'Interno.

Altri Paesi si sono dotati di strumenti normativi più sofisticati volti ad affrontare in maniera più o meno completa alcuni tra i seguenti punti:

- caratteristiche di reazione al fuoco dei materiali isolanti o di rivestimento installati in facciata;
- individuazione di macro-scenari di incendio;
- individuazione di metodologie di test di incendio per sistemi di facciata;
- sviluppo di strumenti di valutazione del rischio per edifici alti;

- individuazione di soluzioni progettuali per evitare l'innescò e la propagazione del fuoco in facciata.

Il panorama normativo è in continua evoluzione, ed è crescente la consapevolezza riguardo le sue problematiche.

1.2.1 Il Codice di prevenzione incendi

Per prevenzioni incendi, come esplicitato nel Codice, si intende la “funzione preminente di interesse pubblico diretta a conseguire, secondo criteri uniformi sul territorio italiano, gli obiettivi di sicurezza della vita umana, di incolumità delle persone e di tutela dei beni e dell'ambiente attraverso la promozione, lo studio, la predisposizione e la sperimentazione di norme, misure antincendio, provvedimenti, accorgimenti e modi di azione intesi ad evitare l'insorgenza di un incendio e degli eventi ad esso comunque connessi o a limitarne le conseguenze”.

Il Codice può essere applicato alle attività di cui all'Art. 2 del decreto stesso, prevalentemente per attività industriali, applicando la regola tecnica orizzontale (RTO), e per quelle provviste di regola tecnica verticale (RTV), come Uffici, Alberghi ed Autorimesse; inoltre, può essere utilizzato in alternativa alle seguenti regole tecniche:

- D.M. 15 marzo 2005 “Reazione al fuoco”
- D.M. 9 marzo 2007 “Prestazioni di resistenza al fuoco”
- D.M. 16 febbraio 2007 “Classificazione di resistenza al fuoco”
- D.M. 20 dicembre 2012 “Impianti di protezione attiva”
- D.M. 9 aprile 1996 "Regola tecnica di prevenzione incendi per la costruzione e l'esercizio delle attività ricettive turistico-alberghiere"

- D.M. 22 febbraio 2006 "Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione e l'esercizio di edifici e/o locali destinati ad uffici"
- D.M. 1° febbraio 1986 "Norme di sicurezza antincendi per la costruzione e l'esercizio di autorimesse e simili", etc.

Si tratta di uno strumento evoluto per l'ottenimento degli obiettivi di sicurezza antincendio, caratterizzato da un linguaggio unico allineato con gli standard Europei. Le strategie antincendio sono interconnesse, e i livelli di prestazione modulabili garantiscono gli obiettivi di sicurezza; esso infatti permette soluzioni progettuali, grazie alla "combinazione" ed alla "sinergia" delle misure antincendio.

Il Codice si basa sulle seguenti ipotesi:

- In condizioni ordinarie, l'incendio di un'attività si avvia da un solo punto di innesco;
- Il rischio di incendio di un'attività non può essere ridotto a zero: le misure antincendio sono selezionate per minimizzare il rischio di incendio in termini di probabilità e di conseguenze, entro limiti considerati accettabili.

Il Codice utilizza una nuova metodologia di approccio consistente nell'individuazione di livelli prestazionali, introdotta per la prima volta in Italia nel campo della resistenza al fuoco con il D.M. 09/03/2007, estendendola a tutte le altre "misure antincendio", come la reazione al fuoco, la compartimentazione, l'esodo, la gestione della sicurezza, il controllo dell'incendio, ecc..

Le fasi per la progettazione possono essere sintetizzate nei seguenti tre punti:

- Valutazione del rischio, finalizzata a stabilire i profili di rischio “ R_{vita} ”, “ R_{beni} ” e “ $R_{ambiente}$ ”;
- Attribuzione di livelli di prestazione;
- Scelta di soluzioni progettuali: per ogni livello di prestazione sono specificate soluzioni conformi e soluzioni alternative).

Una chiara sintesi, di seguito riportata, è schematizzata all’interno del Codice stesso.

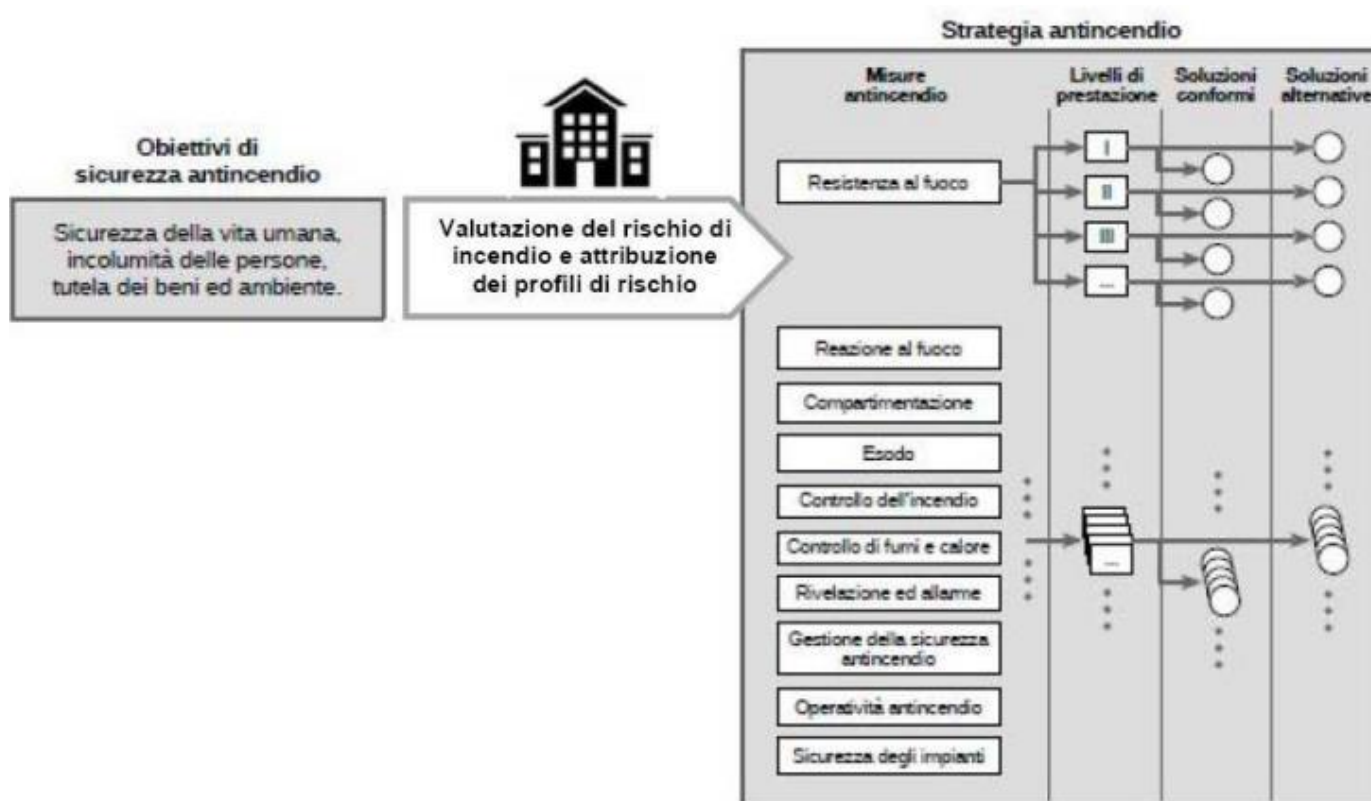


Figura 5 – Fasi di progettazione per la sicurezza antincendio.

1.3 Cenni di teoria del fuoco

Prima di procedere alla descrizione della “fire performance” di varie tipologie di involucri edilizi, è necessario sviluppare e conoscere alcuni punti fondamentali della teoria del fuoco, utili anche al fine di comprendere a pieno il

comportamento in caso di incendio di sistemi fotovoltaici BIPV integrati in facciata.

In generale, lo sviluppo di un incendio all'interno di un ambiente confinato, come ad esempio in una stanza, può essere descritto con riferimento all'andamento temporale della temperatura media durante tale fenomeno. In questo modo è possibile individuare più fasi dello sviluppo dell'incendio:

- Fase di ignizione: in essa il processo di combustione è instabile, governato principalmente dal bilancio termico della reazione;
- Sviluppo di pre-flashover (propagazione): una volta stabilizzata la reazione di combustione, si nota una marcata tendenza all'estensione dell'incendio, associata ad un rapido aumento della temperatura dell'ambiente;
- Flashover;
- Incendio completamente sviluppato, detto "incendio generalizzato": quando la temperatura ambientale tende all'uniformità e raggiunge valori compresi fra 500 ° C e 600 ° C, a seconda delle caratteristiche del compartimento e dei materiali combustibili in esso contenuti, oppure quando la potenza radiante raggiunge i 20 kW/m² a livello del pavimento, si ha il cosiddetto "punto critico", ovvero il punto di completo sviluppo dell'incendio;
- Fase di decadimento finale e raffreddamento: il progressivo esaurimento del combustibile determina la riduzione dell'emissione termica da parte dell'incendio, il quale diminuisce gradualmente d'intensità fino a raggiungere l'estinzione. L'incendio può essere considerato estinto quando la temperatura dell'ambiente scende al di sotto dei 300 ° C,

potendo ragionevolmente escludere improvvisi re-inneschi dovuti al livello termico.

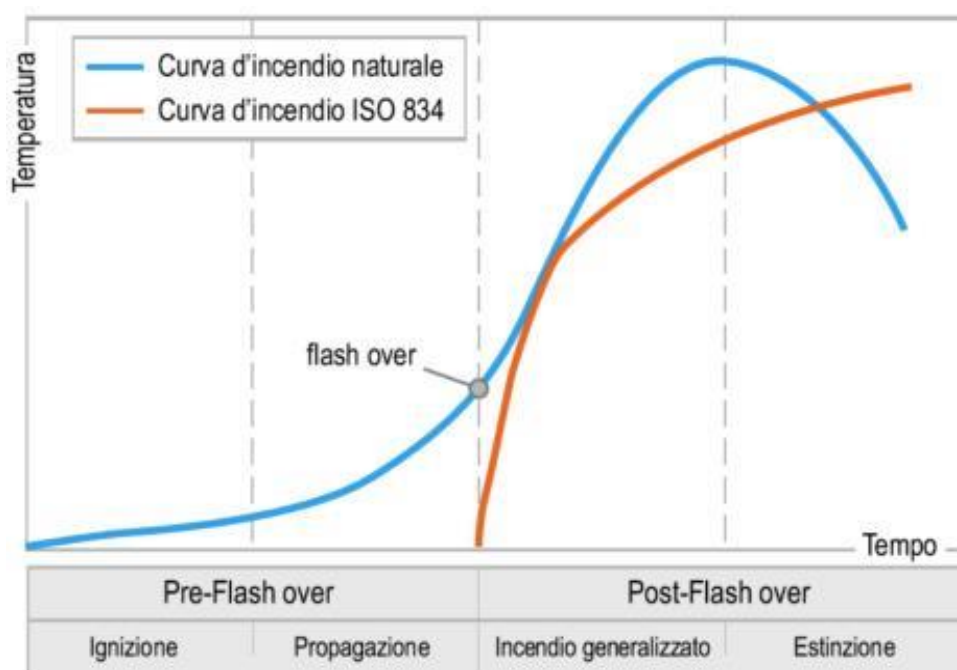


Figura 6 - Fasi di sviluppo dell'incendio: curva temperatura-tempo.

Per quanto riguarda la fase di flashover, questo termine è stato coniato dai vigili del fuoco britannici per indicare l'accensione improvvisa dei gas accumulatisi nella parte alta di un locale durante un incendio generalizzato.

Una riconosciuta definizione di flashover è quella di Kennedy, riportata nella norma "nfpa101: LIFE safety Code 3.3.79": "Una fase dello sviluppo di un incendio al chiuso nel quale tutte le superfici esposte raggiungono la temperatura di accensione più o meno contemporaneamente e il fuoco si propaga rapidamente a tutto il compartimento".

Il rapido momento, durante l'evoluzione di un incendio, in cui tutte le superfici dei materiali combustibili presenti in un locale chiuso o semi chiuso si infiammano, è evidenziato anche dalla definizione francese I.S.O., in cui si afferma che, per raggiungere le condizioni ideali perché un flashover si verifichi,

l'incendio deve svilupparsi in un locale chiuso o semi chiuso e, inoltre, che è necessario essere in presenza di materiali combustibili e che il fuoco si sviluppi rapidamente sulla totalità delle superfici disponibili.

Il flashover coincide con il primo punto di flesso della curva: tutto il materiale combustibile presente nel locale investito dall'incendio prende fuoco contemporaneamente, e questo particolare momento del fenomeno oggetto di studio assume grande rilievo perché rappresenta un gradino improvviso nello sviluppo del fuoco, costituendo anche pericolo per le squadre eventualmente impegnate nell'estinzione.

L'incendio generalizzato è invece "lo stato di coinvolgimento completo di tutto il materiale combustibile all'interno di uno specifico spazio", secondo l'Eurocodice 1. Corrisponde all'ignizione di quasi tutti i materiali combustibili presenti, ed è caratterizzato dall'emissione delle fiamme tramite le finestre, in strati di grande spessore. Il valore di $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ è adottato, nella generalità dei casi, come temperatura di completo sviluppo dell'incendio, salvo determinazioni maggiormente approfondite riferite a casi specifici.

La fase di pieno sviluppo dell'incendio, una volta verificatasi all'interno di un compartimento dell'edificio, può essere caratterizzata da fiamme che possono arrivare fino ad un'altezza di 5 m dal bordo superiore dell'apertura, indipendentemente dal sistema di facciata e dai materiali costituenti la stessa. L'altezza di fiamma è infatti legata in prima istanza alla velocità di circolazione dell'aria.

1.3.1 L'altezza di fiamma

Qualora si dovesse arrivare alla rottura delle finestre a seguito di un incendio in un comparto interno alla costruzione, la propagazione ai piani superiori avverrebbe quindi attraverso le aperture esistenti lungo la facciata, dalle quali

fuoriuscirebbero fiamme, le cui dimensioni dipendono dalla quantità e natura del combustibile presente all'interno del compartimento in cui ha avuto origine il fuoco, nonché dalle dimensioni del vano di apertura o finestra.

Una volta che l'incendio raggiunge una facciata, sono determinanti i materiali e il sistema tecnologico in generale, dai quali dipende l'ulteriore propagazione dell'incendio verso i piani superiori; è ovvio che, nel caso in cui il sistema di facciata comprenda un rivestimento realizzato mediante moduli FV integrati, sarà importante, prima di tutto la reazione al fuoco di tali elementi, e poi anche la loro distanza dalle aperture.

Alcuni tra i fattori che determinano l'entità della propagazione sono:

- la reazione al fuoco dei materiali;
- l'esistenza di intercapedini o cavità nel sistema di facciata;
- la presenza di aperture in facciata che permettono il ritorno dell'incendio all'interno dell'edificio e quindi la prosecuzione in loop del meccanismo descritto.

Un ruolo fondamentale è svolto dai particolari costruttivi che interessano l'imbotte delle aperture, in particolare nella parte superiore delle stesse.

Gli incendi a ventilazione controllata rappresentano il caratteristico scenario in cui un fuoco che brucia in un edificio provoca la rottura delle superfici vetrate esterne (finestre) provocando la fuoriuscita dei gas caldi e il loro movimento in corrispondenza della parte superiore dell'apertura.

Una parte di tali gas caldi non è in grado di bruciare completamente all'interno della stanza a causa del limitato quantitativo di aria nel comparto: in questo caso si parla di incendio controllato dalla ventilazione; ma, a seguito del movimento verso l'esterno, tale parte di gas viene a contatto con l'aria che si muove verso

l'interno, la quale è sufficiente per permettere la combustione dei medesimi gas caldi all'esterno dell'edificio.

Il risultato è una fiamma tendente verso l'alto e sporgente al di fuori della finestra, la cui estensione, da un punto di vista visivo, è in genere stimabile fino al punto in corrispondenza del quale la temperatura della fiamma raggiunge i 540 ° C.

Facendo quindi riferimento ad incendi aventi origine all'interno dell'edificio, è in genere possibile distinguere tre fasi principali che conducono alla propagazione finale:

1. Le fiamme e i gas all'interno dell'edificio attaccano le superfici ed i rivestimenti interni del comparto, nonché gli eventuali materiali che costituiscono le barriere antincendio perimetrali;
2. Le fiamme e i gas caldi, dopo aver provocato la rottura dei vetri delle aperture, sporgono da queste incidendo direttamente sulla superficie esterna della facciata;
3. Le fiamme sporgenti irradiano calore verso altre superfici vetrate poste ai piani o livelli superiori, le quali lo trasferiscono, per irraggiamento, ai materiali e arredi presenti nella costruzione.

Lo studio dell'altezza di fiamma, ai fini della previsione del rischio di propagazione dell'incendio esterno, è stato diffusamente affrontato, anche negli ultimi anni.

In condizioni di incendio "libero", il cosiddetto incendio "all'aperto", l'altezza di fiamma viene di solito indicata con riferimento a quella corrispondente ad una intermittenza pari a 0,5. In altri termini, l'altezza di fiamma è in genere definita come l'altezza Z_f , al di sotto della quale la fiamma è presente almeno il 50 % del

tempo. Nel caso di incendio libero, l'altezza di fiamma viene normalmente correlata alla quantità di moto del flusso di combustibile e agli effetti di galleggiamento dei gas, dovuti alla gravità.

1.4 Comportamento al fuoco delle facciate a cappotto

Nel dettaglio, per quanto riguarda le facciate con sistema costruttivo a cappotto caratterizzate dalla presenza di materiali isolanti combustibili, gli scenari più tipici di diffusione del fuoco sono riconducibili essenzialmente a tre tipologie:

- diffusione del fuoco dall'esterno per effetto radiativo, ad esempio causato dall'incendio di un edificio limitrofo);
- diffusione del fuoco per effetto radiativo o per effetto di fuoco diretto con sorgente situata in prossimità della facciata, ad esempio un incendio sviluppatosi sul balcone o incendio di auto parcheggiata in prossimità della facciata;
- incendio in ambiente interno all'edificio che si propaga alla facciata attraverso aperture della stessa (vani finestre, porte, etc.).

Proprio in quest'ultimo caso, come già detto, in assenza di un rapido intervento di spegnimento, l'incendio può svilupparsi sino al "flashover".

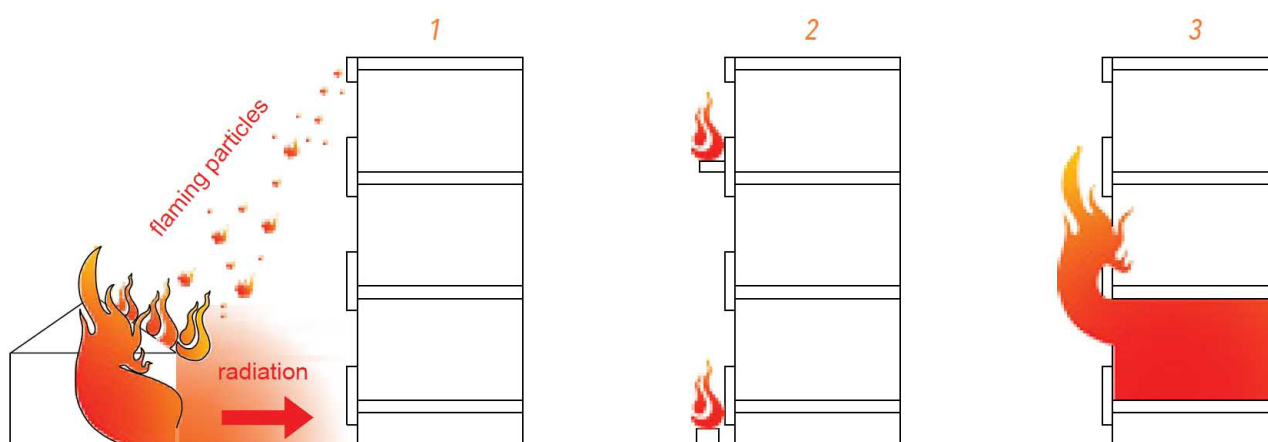


Figura 7 – Diverse tipologie di scenari di incendio.

In seguito alla rottura dei vetri delle aree finestrate, le fiamme possono arrivare, a seconda delle particolari condizioni di flusso d'aria, sino a 5 metri di altezza rispetto all'apertura stessa, indipendentemente dal sistema di facciata e dai materiali utilizzati.

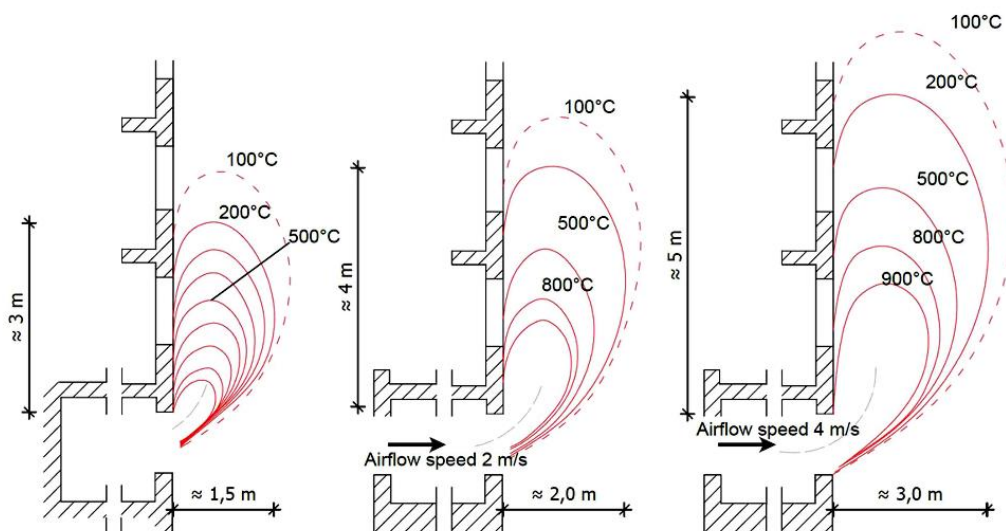


Figura 8 – Propagazione in facciata dell'incendio proveniente dall'interno.

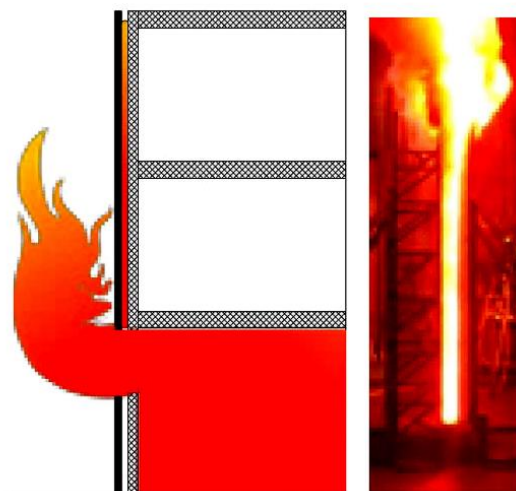


Figura 9 – Incendio che raggiunge la facciata mediante le aperture.

Un obiettivo di progetto è quello di limitare la propagazione dell'incendio ad un'area che coinvolga non più di due piani al di sopra di quello in cui l'incendio si è sviluppato. A tal riguardo, tra le possibili misure che è possibile adottare per

ridurre il rischio di sviluppo e propagazione di un incendio in facciate opache vi sono:

- controllo della reazione al fuoco dei materiali e utilizzo di materiali preferibilmente incombustibili;
- progetto ed esecuzione di elementi “tagliafuoco”, in grado di suddividere l’edificio in compartimenti;
- accorgimenti di controllo della diffusione dell’incendio attraverso le aperture di facciata, tramite elementi “tagliafuoco”, fasce di materiali incombustibili, etc., e attraverso la facciata stessa.

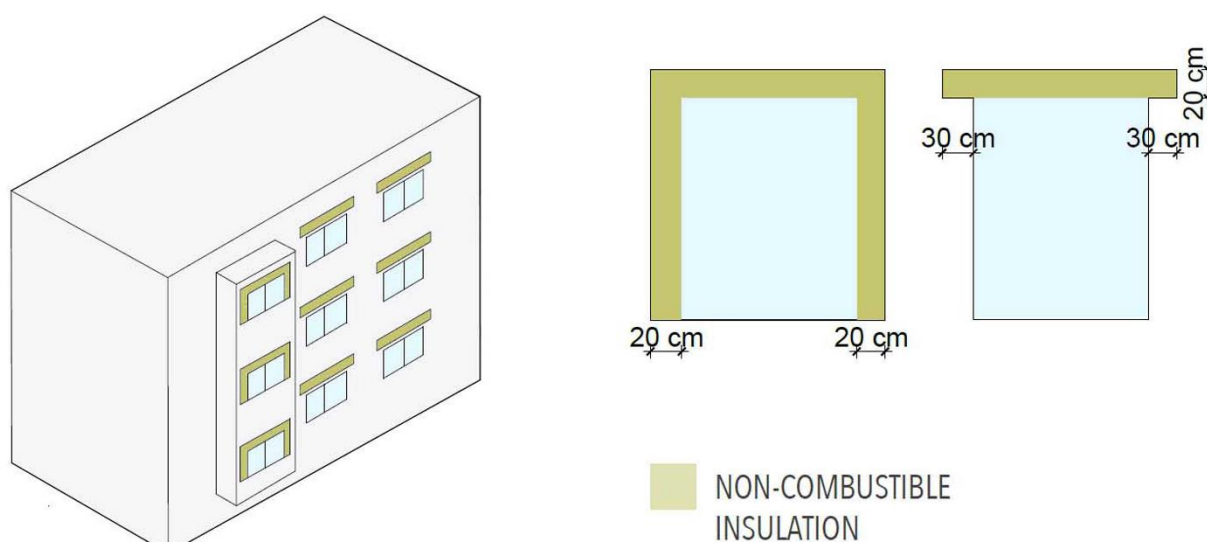
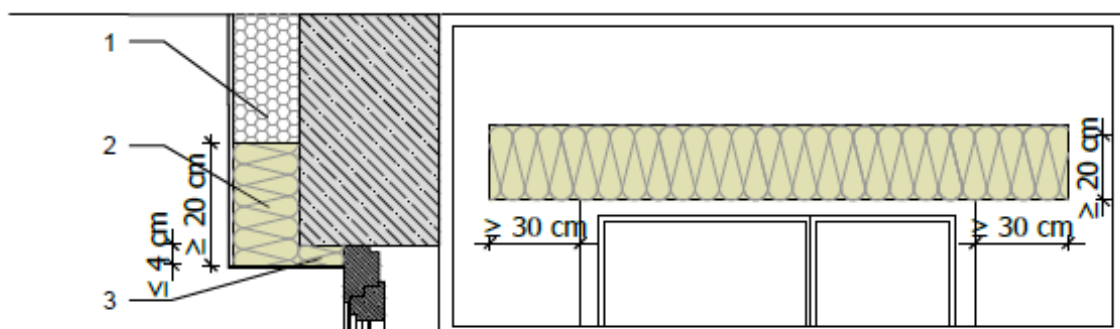


Figura 10 – Utilizzo di fasce tagliafuoco in materiale isolante incombustibile attorno alle aperture di facciata.

In caso di diffusione dell’incendio attraverso le aperture della facciata, punti particolarmente sensibili sono gli spigoli superiori delle aperture, dove, a causa delle alte temperature, si può verificare una decomposizione e il calore e le fiamme possono raggiungere lo strato isolante combustibile della facciata a cappotto. Un metodo di prevenzione consiste nell’utilizzare una protezione addizionale, installando una barriera al fuoco costituita da un materiale con reazione al fuoco A1 o A2-s1, d0, alta come minimo 20 cm, posizionata al di sopra

degli spigoli delle aperture e larga quanto la dimensione dell'apertura fuoriuscendo di almeno 30 cm su entrambi i lati.

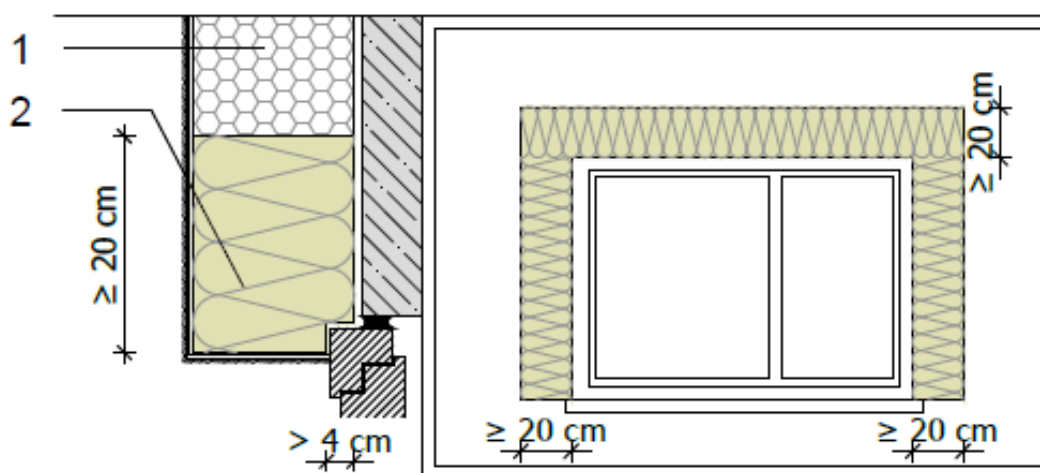


KEY

1. Combustible insulation
2. Non-combustible insulation
3. Non-combustible insulation below the top opening edge

Figura 11 – Dettaglio costruttivo di una fascia tagliafuoco incombustibile sul lato superiore di un'apertura di facciata.

Quando l'edificio presenta isolamento combustibile, vengono installate tali barriere al fuoco attorno le finestre su 3 lati (superiore e i due laterali), con un'altezza minima di 20 cm attorno all'apertura.



KEY

1. Combustible insulation
2. Non-combustible insulation

Figura 12 – Dettaglio costruttivo di una fascia tagliafuoco attorno ad una apertura di facciata.

La diffusione di un incendio in verticale lungo una facciata che presenta un isolante combustibile può essere prevenuta installando, inoltre, una fascia continua con dimensioni stabili costituita da un materiale isolante termicamente, con classe di reazione al fuoco A1 o A2-s1, d0, almeno a piani alternati.

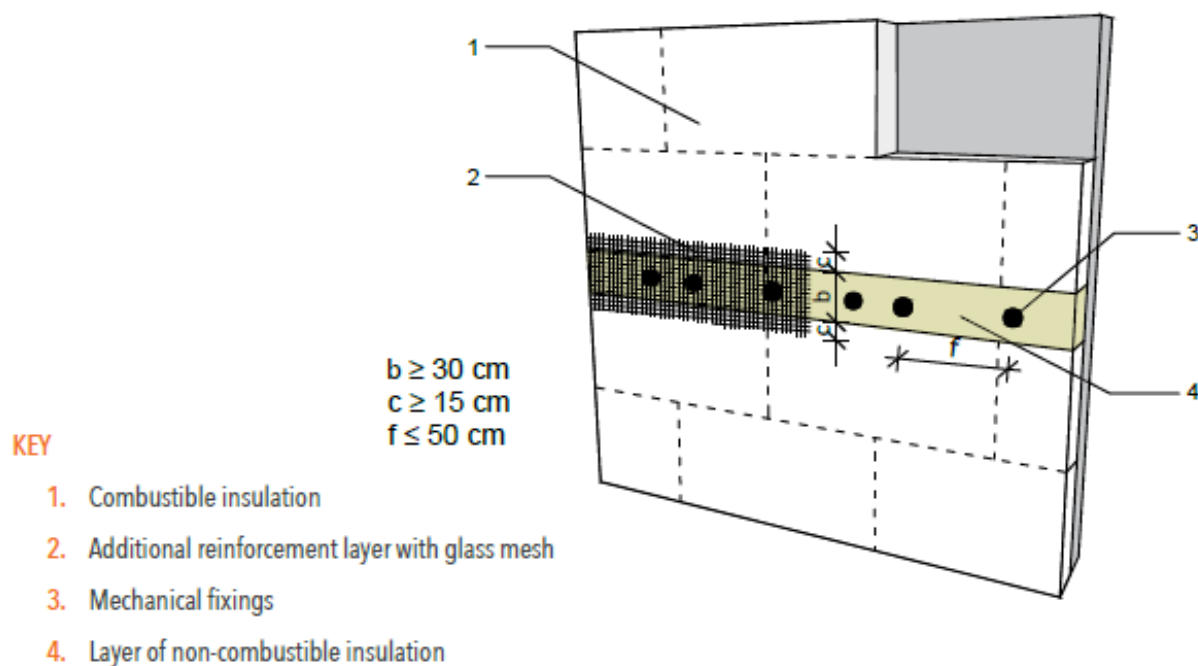


Figura 13 – Fascia orizzontale continua incombustibile per interrompere l'isolamento combustibile.

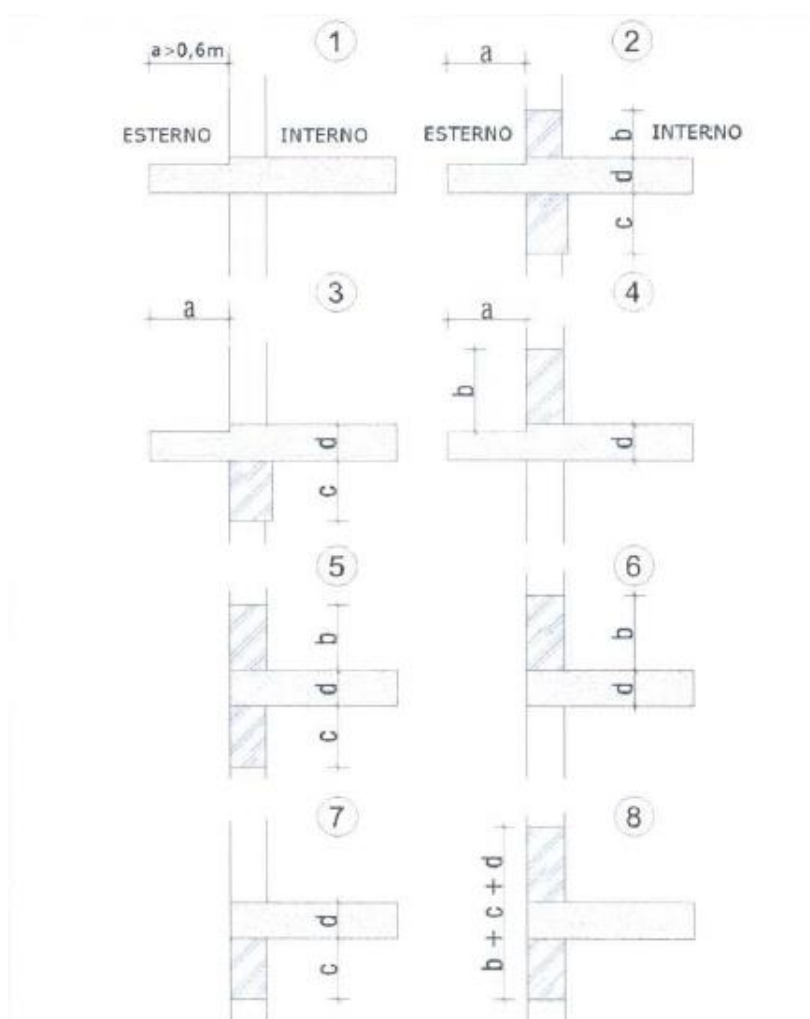
1.5 Comportamento al fuoco di facciate semplici e "curtain walls"

Passando poi alle facciate semplici, esse devono presentare, in corrispondenza di ogni solaio e di ogni muro trasversale con funzione di compartimentazione, una fascia costituita da uno o più elementi costruttivi di classe di resistenza al fuoco E60-ef. Inoltre, nel caso delle facciate di tipo "curtain walls", ovvero in tutti i casi in cui l'elemento di facciata non poggia direttamente sul solaio, è inoltre richiesto che l'elemento di giunzione della facciata ai solai e ai muri trasversali di compartimentazione sia di classe di resistenza al fuoco EI 60.

A tale proposito, la fascia di separazione orizzontale tra i compartimenti prevede che la porzione della facciata avente uno o più elementi costruttivi resistenti al fuoco sia costituita da:

- Una sporgenza orizzontale a protezione della parte della facciata situata al di sopra del solaio, di larghezza "a" uguale o superiore a 0,60 m, raccordata al solaio;
- Un parapetto continuo di altezza "b" al piano superiore, raccordato al solaio;
- Un architrave continuo di altezza "c", raccordato al solaio;
- Lo spessore del solaio "d".

La somma delle dimensioni a,b,c e d deve essere uguale o superiore ad 1 m.



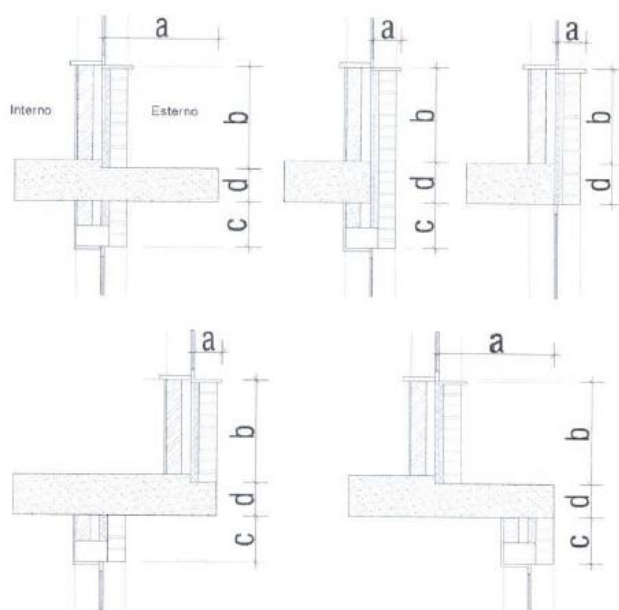


Figura 14 – Varie configurazioni di “pannello parafiamma” E 60 – ef.

1.6 Comportamento al fuoco di facciate trasparenti a doppia pelle

Le facciate trasparenti comportano diverse sfide in campo di sicurezza al fuoco degli edifici a causa dell'uso estensivo di vetro altamente fragile e di materiali metallici deformabili ad alte temperature. Il fuoco e i fumi possono propagarsi ai piani superiori attraverso rotture all'interno del sistema, tramite il gap perimetrale fra il pavimento e la facciata nel caso in cui non sia stato saldato in modo appropriato o sia stato danneggiato dall'incendio, o mediante l'effetto camino all'interno della cavità di aria, che può accelerare tale fenomeno.

Quando il vetro viene esposto al fuoco e al fumo, si verifica un aumento della differenza di temperatura fra la parte di vetro surriscaldata e l'area dei bordi. Come risultato, gli stress termici si sviluppano sempre di più a causa delle differenze di temperatura, e i pannelli di vetro possono rompersi e addirittura, ad un certo punto, cadere giù.

Risultati sperimentali dimostrano che il vetro temperato sembra però sopravvivere a temperature molto più alte rispetto ad un vetro tradizionale, e in

questo caso diminuisce la probabilità di rottura fino a dopo che l'incendio raggiunge il "flashover", a circa 600 °C.

Inoltre, un doppio strato di vetro temperato può sopportare incendi molto più severi di un sistema monostrato. Test dimostrano che i pannelli composti da un doppio strato di vetro temperato si rompono quando le temperature raggiungono i 600 – 800 °C, dal momento che le fiamme e i fumi provenienti da una stanza dell'edificio vanno ad ostacolare la "pelle" esterna della cavità nella fase di combustione costante, e questo ne causerebbe la rottura.

Nel caso di scenario di incendio completamente sviluppato, le fiamme e i fumi colpiscono i pannelli esteriori senza attaccare quelli interiori, e quindi possono rompere la pelle esterna lasciando intatta e a basse temperature quella interna.

Se la fonte dell'incendio è situata vicino alla facciata, le temperature in prossimità della facciata esteriore possono arrivare fino a 400 °C; questo potrebbe causare la rottura della pelle esterna se costituita da vetro normale. Però, se la fonte dell'incendio si trova più al centro dell'edificio, le temperature prossime ai pannelli interni ed esterni non raggiungono i 300 °C, e nessun tipo di vetro si rompe sotto tali temperature.

In generale, si può dire che quando l'intercapedine presenta uno spessore maggiore, le temperature sul lato esterno diminuiscono e la pelle interna non viene attaccata dal fumo.

1.7 Comportamento al fuoco delle facciate ventilate

Viene ora analizzato il comportamento al fuoco delle facciate ventilate, per poter comprendere a pieno come questo sistema costruttivo possa aggravare la sicurezza antincendio globale della costruzione, soprattutto nel caso in cui il

rivestimento sia costituito da elementi fotovoltaici BIPV, integrati nell'involucro dell'edificio.

In primo luogo, le facciate ventilate sono dei sistemi multistrato in cui la caratteristica principale è quella di creare una camera d'aria per la circolazione, fra la parete dell'edificio e il rivestimento esteriore. Queste facciate incorporano quindi diversi layers fondamentali: lo strato isolante, posizionato solitamente sulla superficie esterna della parete, la cavità d'aria e il rivestimento esteriore. Al fine di fissare il rivestimento, viene utilizzato un sistema di supporto progettato per reggere sia il peso proprio della sottostruttura che il carico sismico e del vento. Tale sistema è solitamente costituito da binari di fissaggio, solo verticali o sia verticali che orizzontali, ancorati alla struttura tramite delle staffe.

Il cosiddetto "effetto camino" nella cavità è un meccanismo che, da un punto di vista energetico, migliora il comportamento termico della facciata ed evita l'apparizione di umidità da pioggia e condensazione. Il gap d'aria previene quindi le infiltrazioni e, a seconda del progetto, può dar luogo ad un pareggiamento della pressione lungo la pelle esterna; inoltre, nel caso di acqua che penetra all'interno dell'intercapedine, essa viene drenata via.

Le facciate ventilate sono di conseguenza sempre più utilizzate, grazie alla rimozione di umidità atmosferica e condensa dall'involucro dell'edificio mediante l'intercapedine di aria fra l'isolamento e il rivestimento.

In generale, i principali vantaggi delle facciate ventilate sono:

- Alta lavorabilità: la preparazione del muro portante è praticamente non richiesta, e tutti i componenti presentano un alto grado di prefabbricazione;

- Velocità di installazione;
- Assenza di procedimenti di posa “umidi”;
- Installazione molto semplice, anche se richiede qualifica e formazione dei lavoratori;
- Montaggio che non richiede ponteggi;
- Elementi customizzati, anche direttamente in cantiere;
- Possibilità di procedere con i lavori in qualsiasi periodo dell’anno;
- Vita utile stimata può raggiungere i 50 – 100 anni;
- Bassi costi di operazione;
- Ampia scelta di materiali per isolare termicamente.

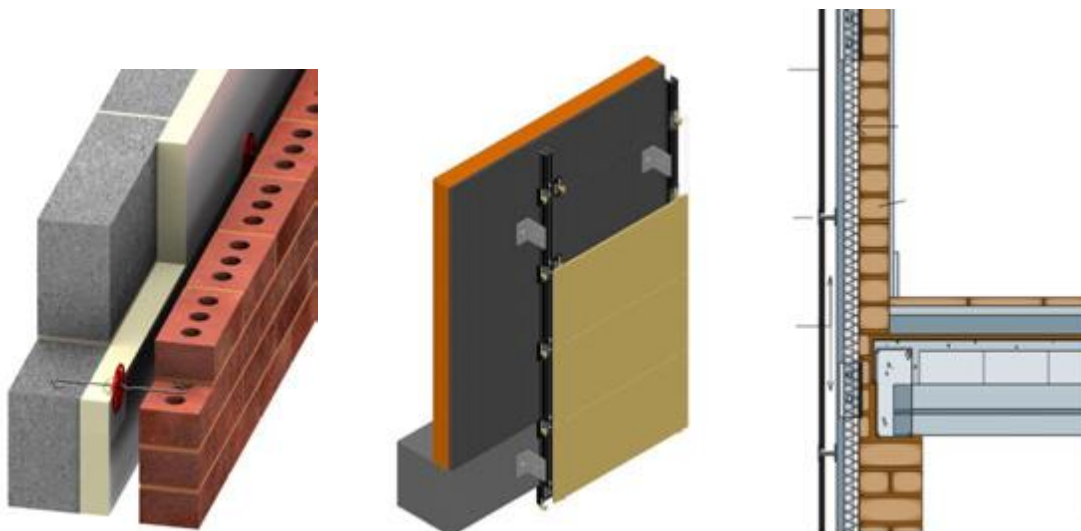


Figura 15 – Esempi di facciate ventilate. (FV-04)

Quando si tratta di eseguire dei test per verificare il comportamento di tali sistemi di facciate, non è possibile utilizzare test a piccola scala, come invece si fa ad esempio per le facciate a cappotto, bensì è necessario studiare casi reali.

I test effettuati in laboratorio dimostrano che, utilizzando solo la reazione al fuoco, è possibile stimare la sicurezza antincendio di una facciata di un edificio, testando i singoli materiali che la compongono e la combinazione fra essi. I test

in scala reale per le facciate ventilate hanno ottenuto risultati simili a quelli previsti dai test di reazione al fuoco.

Al fine di valutare i potenziali effetti di alcune soluzioni utilizzabili nei più comuni sistemi di facciata ventilata, viene qui riportata un'analisi, svolta per l'articolo "Fire safety issues in high-rise building facade", riguardante le differenze nel carico di combustibile equivalente a seconda dei materiali isolanti, considerando il caso di un edificio di riferimento a torre di altezza 70 m (22÷24 piani) con una superficie in pianta di 625 m² (25 m x 25 m). Si è ipotizzata una percentuale del 70% della superficie complessiva di facciata come costituita da un sistema a facciata ventilata (4.900 m²) e il restante 30% della superficie da finestre e aperture. In conclusione, si raggiungono valori estremamente elevati di combustibile equivalente.

	PIR	XPS	EPS	Phenolic foam	Rockwool
<i>Density (kg/mc)</i>	34	35	20	35	60
<i>Thickness (mm)</i>	150	240	240	150	240
<i>Calorific value (MJ/kg)</i>	27	46	46	27	*
<i>Eq. fuel load (l)</i>	19.992	56.100	32.057	20.580	1.411

Figura 16 – Confronto fra diversi materiali isolanti.

Anche il fattore geometrico della facciata influenza lo sviluppo dell'incendio e la sua diffusione attraverso la superficie della facciata; in particolare, ha un impatto sulla velocità e propagazione dell'incendio, e sulla forma e traiettoria della vampata di fuoco.

A seguito di un'analisi delle regolamentazioni e/o dei report, si può dire che:

- L'isolamento che presenta una classe inferiore a B-s1 deve essere adeguatamente protetto e posizionato, contro la diffusione dell'incendio;
- L'isolamento di un sistema ventilato deve essere almeno di classe A2;

- I materiali delle pareti esteriori devono essere almeno di classe B-1, d0, questo vieta tutti i tipi di EPS/XPS, anche se ignifughi;
- Il valore di resistenza al fuoco dovrebbe essere almeno REI 120 min, anche se in molte normative nazionali viene richiesto un tempo minore o uguale a 60 min.

Inoltre, un aspetto critico in caso di incendio, per una facciata ventilata, è il comportamento della sottostruttura metallica, la quale è responsabile dell'integrità e stabilità dell'intera struttura del rivestimento. Per questo motivo, non è consigliato l'uso di materiali fusibili, altrimenti, in caso di incendio, potrebbero distaccarsi pezzi della facciata e cadere; per questo il materiale più affidabile per tale utilizzo è l'acciaio.

L'applicazione di materiali protettivi e isolanti è uno dei metodi più comuni di protezione nei confronti della sottostruttura metallica in caso di incendio; infatti, le variazioni di temperatura nei materiali portano a cambiamenti delle loro proprietà e delle caratteristiche di forza strutturale, fatto che diventa evidente quando la temperatura aumenta significativamente. L'unica possibilità di ottenere un controllo della resistenza della sezione in acciaio durante un incendio consiste nella sua protezione contro il fuoco tramite materiali isolanti propriamente scelti. Gli indicatori di sostenibilità di una struttura metallica esposta al fuoco possono essere raggruppati come segue: il primo indicatore indica la sicurezza e la robustezza della struttura, un altro si riferisce all'impatto sulla società, e, infine, alla progettazione passiva di una protezione contro gli incendi e l'ambiente, compresi gli aspetti del ciclo di vita dei materiali utilizzati. Questa è una valutazione che permette di limitare i costi di protezione che sarebbero sproporzionatamente elevati rispetto ai costi della struttura stessa.

La ventilazione naturale dell'intercapedine retrostante il rivestimento rappresenta però il principale aspetto critico nei confronti della limitazione della diffusione dell'incendio.

L'intercapedine di ventilazione è un elemento che influenza significativamente il comportamento dell'incendio. In una facciata ventilata, come si è già visto, il fuoco può diffondersi nelle seguenti maniere:

- Tramite le aperture delle finestre, secondo il cosiddetto "leap frog effect";
- Attraverso la superficie del rivestimento, quando la reazione al fuoco dei materiali contribuisce alla diffusione dell'incendio;
- Lungo la cavità ventilata a causa dell'effetto camino, se non vengono adoperate adeguate barriere al fuoco; quest'ultimo è il percorso che comporta la propagazione più veloce.

Una volta che l'incendio ha raggiunto l'intercapedine d'aria, si presentano i seguenti pericoli relativi alla propagazione del fuoco lungo la cavità:

- Proprietà termiche dell'isolante: se viene utilizzato un materiale combustibile, cosa che capita spesso, l'intensità dell'incendio aumenta;
- Sottostruttura della facciata: le temperature possono raggiungere e superare i 600 °C e, indipendentemente dal tipo di pannello esterno, se il fuoco entra nella cavità e viene in contatto con la sottostruttura in alluminio, quest'ultima potrebbe perdere localmente la sua stabilità e integrità nel momento in cui si surriscalda. Sotto condizioni di esposizione prolungata al fuoco, i montanti possono sciogliersi, e questo porterebbe ad un collasso localizzato del sistema;
- Forma dell'intercapedine ed effetto camino: la diffusione del fuoco nelle facciate ventilate accade tramite le finestre e l'intercapedine, e questo

può verificarsi anche in modo simultaneo. Quando le fiamme vengono confinate all'interno della cavità, esse ricercano ossigeno e combustibile col fine di supportare il processo di combustione e, di conseguenza, si allungano. Tale processo, unitamente all'effetto camino, può portare ad un'estensione delle fiamme da cinque a dieci volte maggiore rispetto alla diffusione dell'incendio tramite le finestre. Questo potrebbe permettere al fuoco di propagarsi molto velocemente senza esser visibile dall'esterno a causa del rivestimento, nel caso in cui non siano state previste barriere al fuoco;

- Zone vulnerabili: i telai di porte e finestre, solitamente in alluminio o PVC e senza barriere al fuoco o sigillature, potrebbero costituire un accesso diretto all'interno dell'intercapedine.

Nel caso di incendio sviluppatosi in una stanza dell'edificio, esso cresce, si evolve e si spegne in diretta correlazione con l'equilibrio di massa ed energia del vano in cui viene prodotto. L'energia sviluppata dipende dal tipo e dalla quantità di combustibile disponibile e dalle condizioni di ventilazione. Nella fase di pre-flashover, la temperatura della stanza è ridotta e l'incendio si mantiene ancora localizzato (minimo). Questa fase è di solito particolarmente importante per l'evacuazione e lo spegnimento delle fiamme, e normalmente non si hanno effetti sulle strutture, mentre se l'incendio evolve verso la fase di incendio generalizzato, la struttura della facciata ventilata ne risente.

Concludendo, dopo aver analizzato le varie caratteristiche di questo sistema di facciata e come queste vadano ad aumentare il rischio di propagazione degli incendi, in generale una qualsiasi tipologia di facciata ventilata dovrebbe essere completamente incombustibile.

1.7.1 Riferimenti normativi per il rischio incendio delle facciate

Il Codice di prevenzione incendi è una norma di carattere generale e non tratta le facciate degli edifici nello specifico. Il rischio di incendio associato alle facciate dipende certamente dalla strategia antincendio adottata per l'edificio, intesa come "combinazione delle misure antincendio finalizzate al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza antincendio", ma esistono una serie di considerazioni aggiuntive che il Codice non propone.

Il panorama normativo italiano risulta carente sotto questo aspetto specifico, se messo a confronto con quanto esiste per altre nazioni che si sono dotate di strumenti spesso molto efficaci per la loro semplicità applicativa, e consiste principalmente nella Guida Tecnica "Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili", emanata attraverso Lettera Circolare del Ministero dell'Interno, che costituisce il riferimento normativo ad oggi più specifico per le facciate, di carattere volontario.

Di seguito viene fornito uno stato dell'arte riguardante le norme, i testi, le linee guida e le ricerche di maggior interesse, svolte in Europa e in altri Paesi extra-europei; lo scopo è quello di evidenziare le considerazioni peculiari e trasversalmente condivise di ogni documento analizzato, per estrarne informazioni utili alla definizione di uno strumento specifico per facciate ventilate in caso di incendio.

Austria

L'Associazione Austriaca per le Facciate Ventilatae (ÖFHF - Österreichischer Fachverband für hinterlüftete Fassaden) ha redatto, nel marzo del 2018, una Guida Tecnica chiamata "Brandschutz bei hinterlüfteten Fassaden" ("Protezione antincendio per facciate ventilate").

Questa linea guida riassume le attuali informazioni sulla base della pianificazione ed implementazione della protezione antincendio delle facciate ventilate, con l'obiettivo di portare chiarezza e sicurezza a tutti i soggetti coinvolti, in primo luogo progettisti ed esecutori dell'opera costruttiva.

Vengono riportate una serie di normative a riguardo, divise anche per le varie regioni del Paese, e sono poi descritti gli scenari di incendio in facciata, ovvero le possibili cause di incendio.

Il regolamento europeo sui prodotti da costruzione (CPR, UE 305/2011) contiene i seguenti requisiti essenziali per la pianificazione, progettazione e costruzione di edifici antincendio:

- La capacità portante della struttura deve essere mantenuta durante l'incendio per un certo periodo di tempo;
- Lo sviluppo e la propagazione del fuoco e del fumo all'interno dell'edificio devono essere limitati;
- La propagazione del fuoco alle strutture limitrofe deve essere evitata;
- I residenti devono lasciare l'edificio illeso o poter essere soccorsi mediante altre misure di sicurezza;
- La sicurezza delle squadre di soccorso deve essere presa in considerazione e deve essere possibile svolgere un lavoro efficace.

Nel documento si considera lo scenario di un incendio completo all'interno di una stanza come il caso più comune di esposizione al fuoco di una facciata, in base al quale vengono sviluppati i requisiti di protezione antincendio.

Fondamentalmente, gli obiettivi principali alla base dei requisiti postulati in Austria, sono quello di limitare la propagazione del fuoco e quello di limitare la caduta di parti di facciata.

Al fine di evitare che si verifichino gli scenari di incendio all'esterno dell'edificio in questione, è necessario prestare attenzione alla scelta del materiale di rivestimento, in modo tale che non rappresenti un carico d'incendio aggiuntivo, non favorisca la propagazione del fuoco e impedisca il più a lungo possibile alle fiamme di penetrare nell'intercapedine ventilata.

Nella Linea Guida 2 dell'OIB, in conformità con gli obiettivi di protezione, vengono stabiliti i requisiti per il comportamento al fuoco, nonché per l'efficace limitazione della propagazione del fuoco lungo la facciata e della caduta di grandi parti di essa. Vengono quindi definite classi di comportamento al fuoco, utilizzando il requisito della reazione al fuoco, a seconda del tipo di facciata ventilata e della classe dell'edificio (da 1 a 5 + "grattacieli", in base all'altezza dell'edificio); tali classi sono riportate in una tabella della ÖNORM EN 13501-1.

Infine, vengono proposte alcune misure per la progettazione strutturale di facciate ventilate, al fine di raggiungere gli obiettivi di protezione, come ad esempio l'utilizzo di barriere tagliafuoco. Si tratta di componenti che vengono utilizzati per limitare la propagazione del fuoco lungo la camera di ventilazione di una facciata ventilata. Le barriere tagliafuoco servono quindi a limitare lo sviluppo del fuoco nell'intercapedine per un periodo di tempo sufficientemente lungo, posizionate in orizzontale o in verticale, interrompendo o riducendo parzialmente la sezione trasversale libera della camera d'aria.

Si considera soddisfatto il requisito di protezione contro la propagazione del fuoco, senza necessità di ulteriori prove, se la barriera tagliafuoco è costituita da un profilo continuo in lamiera di acciaio con uno spessore minimo di 1 mm, o da uno, equivalente in termini di protezione antincendio, a sbalzo di almeno 20 cm.

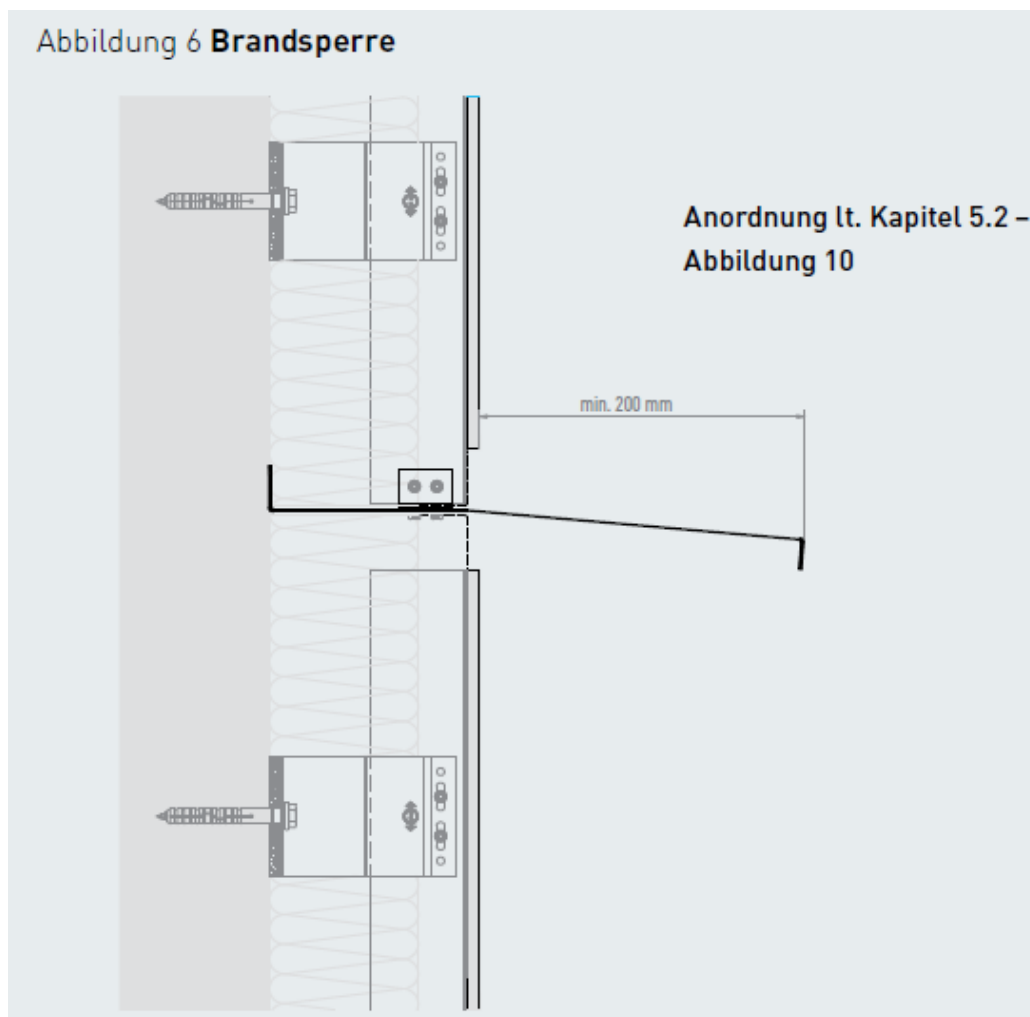


Figura 17 – Dettaglio costruttivo di una facciata ventilata che presenta una barriera antincendio in intercapedine, o interna o a sbalzo.

Affinché le barriere tagliafuoco possano essere considerate un metodo efficace per il raggiungimento della protezione antincendio, esse devono essere applicate in corrispondenza di ogni piano dell'edificio. Le aperture presenti in facciata, come porte e finestre, possono essere parte integrante delle barriere, a condizione che lo spazio di ventilazione venga racchiuso dal rivestimento e dagli architravi delle aperture, e che la sottostruttura e l'eventuale isolamento termico esistenti siano costituiti da materiali da costruzione non combustibili. Di seguito, vengono riportate immagini esplicative delle differenti opzioni di posizionamento di sistemi di barriere tagliafuoco.

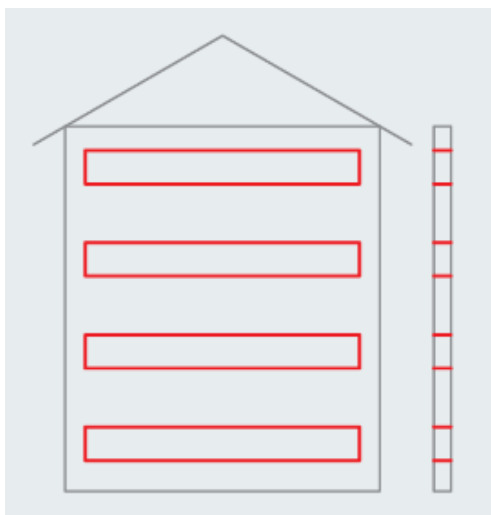


Figura 18 – Barriera tagliafuoco come nastro continuo attorno le aperture.

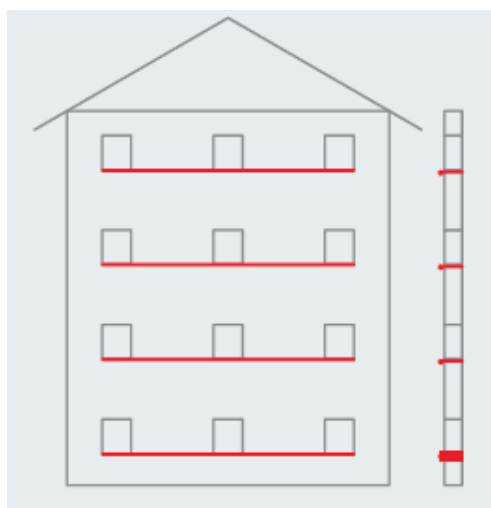


Figura 19 - Barriera tagliafuoco fra finestra e zona del davanzale.

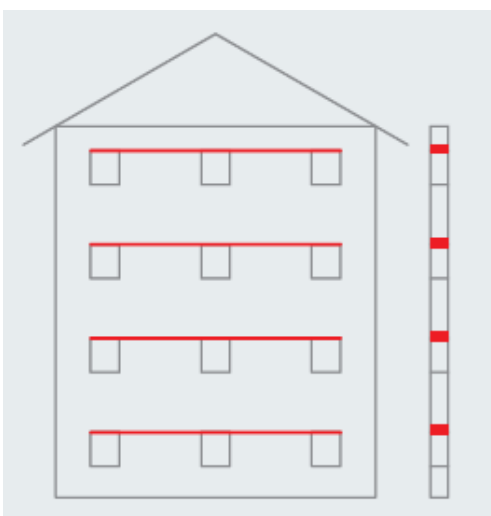


Figura 20 - Barriera tagliafuoco fra finestra e zona dell'architrave.



Figura 21 - Barriera tagliafuoco in corrispondenza di ogni piano.

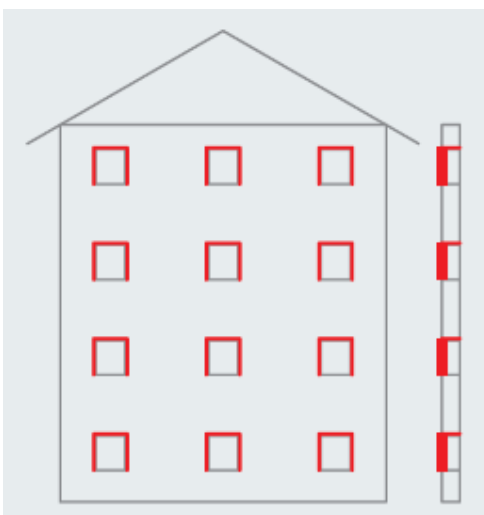


Figura 22 - Barriera tagliafuoco attorno ad ogni apertura.

Belgio

In Belgio, il BBRI (Belgian Buildings Research Institute) in collaborazione con SECO e con la Confédération Construction, ha di recente sviluppato un documento intitolato "Fire safety of multi-storey building facades".

Gli obiettivi principali di tale documento sono quelli di:

- Fornire una panoramica dell'attuale quadro normativo riguardante la sicurezza antincendio in Belgio e, più in particolare, riguardo al rischio di incendio delle facciate degli edifici;

- Delineare i punti chiave e le caratteristiche costruttive che rendono possibile garantire la corretta progettazione e installazione dei sistemi di facciata comunemente usati, tenendo conto delle esigenze attuali e future del Belgio.

Questo documento si basa in parte sulle proposte di modifiche al regolamento emanato nel febbraio 2017 del gruppo di lavoro “Facciate”, fondato dal “Conseil supérieur de la sécurité contre l'incendie et l'explosion”. Tali proposte sono provvisorie e, di conseguenza, soggette a modifiche, ma la versione finale del regolamento è stata poi presentata al Consiglio superiore belga a fine del 2018.

High-rise buildings > 36 m				
Large-scale test				
OR				
<u>Non-combustible</u> End use: A2-s3,d1 Substantial component: A2-s3,d0 Maximum percentage of secondary frame which is not subject to any reaction-to-fire requirement: 10%				
Mid-rise and high-rise buildings ≤ 36 m				
Large-scale test				
OR				
End use: B-s3,d1				
Maximum percentage of secondary frame which is not subject to any reaction-to-fire requirement: 10-20%				
Ventilated facade		Non-ventilated facade - ETICS		
<u>Non-combustible</u>	<u>Combustible</u>	<u>Non-combustible</u>	<u>Combustible</u>	
Substantial component A2,s3-d0	<u>Interruption every two levels</u> - either by a metal flashing - or by a non-combustible barrier (in case of a fire)	Substantial component A2,s3-d0	<u>Fusible insulation</u> (EPS, XPS) DIBT standard solutions	<u>Non-fusible insulation</u> (PUR, PIR, ...) Interruption by a non-combustible strip: - either every two levels - or above the windows
Low-rise buildings				
End use: D-s3,d1				
Substantial component: E				

Figura 23 – Valori di reazione al fuoco a seconda del tipo di isolante e dell'altezza dell'edificio.

Il documento fornisce un'identificazione delle modalità di diffusione del fuoco attraverso le facciate e i relativi accorgimenti da adottare:

- Caso di fuoco diffuso attraverso la superficie del rivestimento della facciata: per rallentare questo tipo di diffusione, si devono generalmente prendere misure relative alla reazione al fuoco del rivestimento di facciata;
- Caso di fuoco diffuso da un compartimento all'altro: internamente, attraverso la giunzione tra il pavimento e l'elemento di facciata o, esternamente, quando le fiamme escono dalla facciata passando, per esempio, attraverso gli elementi vetrati che non sono resistenti al fuoco. Per ovviare a questo tipo di diffusione, è necessario garantire la resistenza al fuoco del nodo tra pavimento e facciata e quella dell'elemento di facciata di piano;
- Caso di fuoco diffuso all'interno del sistema di facciata attraverso componenti combustibili (ad esempio l'isolamento, l'intercapedine d'aria situata dietro il rivestimento, ecc.). Si può ridurre questo rischio utilizzando elementi non combustibili o elementi a combustibilità limitata, interrompendo gli strati di isolanti combustibili, la cavità d'aria ventilata, ecc.

Il Real Decreto Belga del 7 luglio 1994 stabilisce gli standard di base in termini di prevenzione degli incendi, e definisce alcuni requisiti atti a limitare o rallentare la propagazione dell'incendio attraverso il rivestimento di facciata. Questi requisiti fanno riferimento alla reazione al fuoco del sistema di rivestimento e consentono di limitare il rischio di incendio diffuso sulla superficie della facciata. Viene quindi stabilito che "il rivestimento di facciata di edifici bassi ($h < 10$ m) deve essere di classe D-s3, d1, mentre il rivestimento di facciata degli edifici di

media e alta altezza deve essere di classe B-s3, d1. Un massimo del 5 % della superficie visibile di queste facciate è esentato da questo requisito”.

È importante stabilire che tali requisiti sono da applicare ai progetti di costruzione nelle loro condizioni finite di esecuzione, ovvero tenendo conto anche del possibile impatto degli strati di materiali sottostanti e del loro metodo di fissaggio. Il rivestimento di facciata su cui si applica il requisito di reazione al fuoco non può quindi essere considerato singolarmente, ma come se fosse eseguito in cantiere. Di conseguenza, in caso di facciata ventilata, i requisiti valgono per l'intero sistema, vale a dire il rivestimento, l'intercapedine d'aria ventilata, l'eventuale pannello sottostante, l'isolamento ed il sistema di fissaggio.

Tornando al requisito di facciata, vale a dire minimo B-s3, d1 per edifici di media e alta altezza, i materiali posti dietro il rivestimento (isolamento, pannelli, ecc.) non devono essere presi in considerazione se sono protetti da un elemento con classe di protezione $K_2 10$, che li preserva da eventuali surriscaldamenti ed inneschi di combustione o carbonizzazione per un periodo di 10 minuti.

Al fine di limitare il rischio di propagazione interna dell'incendio, la giunzione tra gli elementi di compartimentazione (ad esempio i solai) e la facciata deve avere una resistenza al fuoco almeno EI 60, tranne nel caso di edifici bassi. Inoltre, lo “scheletro” della facciata leggera deve essere fissata in corrispondenza di ogni livello della struttura portante dell'edificio per evitare che la facciata crolli in caso di incendio. I tasselli di fissaggio devono presentare una resistenza al fuoco R 60 o essere protetti contro gli incendi che si possono sviluppare nel vano immediatamente sottostante. Possono essere posizionati sotto il solaio, in corrispondenza del bordo o sul pavimento.

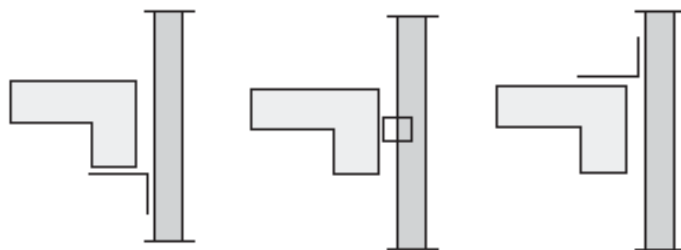


Figura 24 – Diverse configurazioni di posizionamento dei tasselli di fissaggio.

Per evitare che il fuoco proveniente dall'esterno si propaghi da un compartimento all'altro, l'elemento di facciata deve avere un certo livello di resistenza al fuoco in corrispondenza di ciascun elemento di compartimentazione, come ad esempio il pavimento di piano. Negli edifici bassi (≤ 10 m) non è richiesta alcuna prescrizione a riguardo, dal momento che l'intervento dei vigili del fuoco e l'evacuazione degli occupanti sono facilitati dalla limitata altezza dell'edificio. Invece, nel caso di edifici di media o alta altezza, deve essere soddisfatto uno dei seguenti tre requisiti:

1. La facciata deve essere dotata di un elemento da costruzione con resistenza al fuoco E 60 e deve avere una lunghezza sviluppata minima di 1 m a livello del pavimento del vano ($a + b + c + d \geq 1$ m);

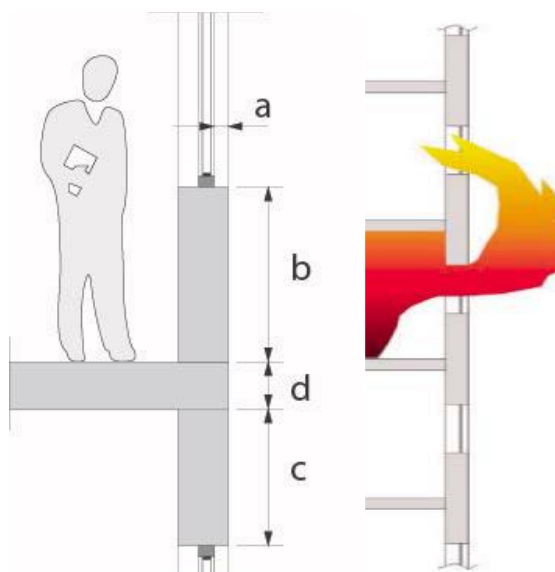


Figura 25 – Pannello parafuoco per prevenire la propagazione dell'incendio da un compartimento all'altro.

2. La facciata deve presentare una resistenza al fuoco almeno E 30 per l'intera altezza dell'edificio, o almeno E 60 ogni due livelli;

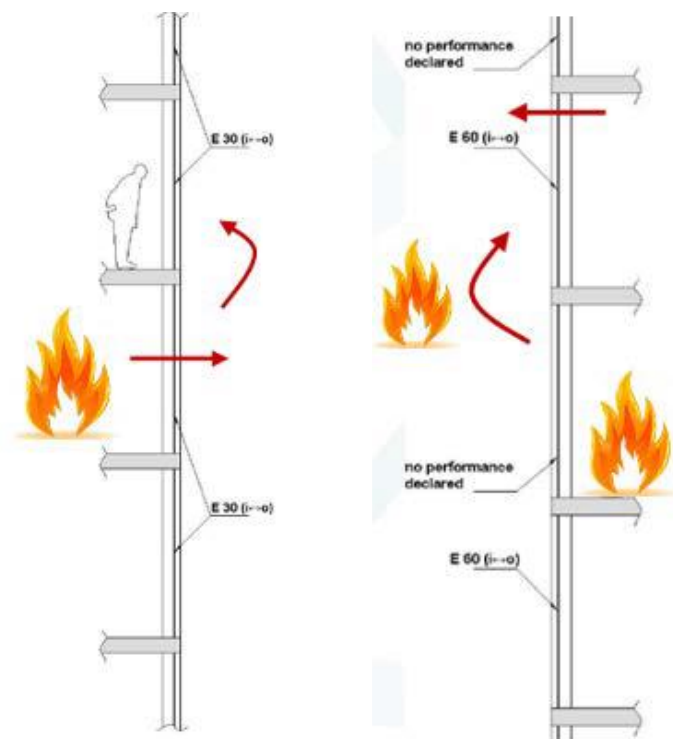


Figura 26 – Due opzioni di valori di tenuta E di facciata.

3. I vani posti lungo la facciata devono essere dotati di un sistema automatico di sprinkler. In questo caso, non è necessario adottare misure aggiuntive.

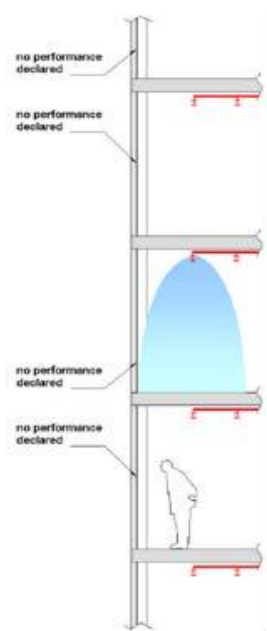


Figura 27 – Sistema di spegnimento automatico con sprinkler.

Un'alternativa all'elemento di facciata E 60 di 1 m in verticale (soluzione 1) è quella di prevedere una sporgenza orizzontale E 60 di 60 cm.

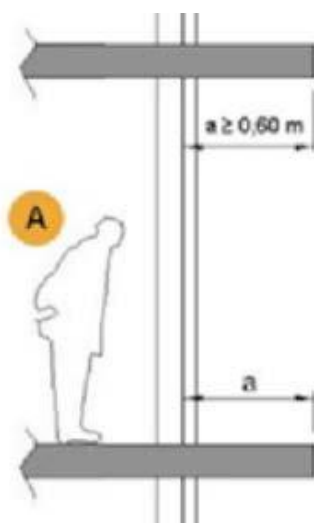


Figura 28 – Alternativa orizzontale a sbalzo al pannello parafiamma verticale.

Nello specifico, parlando di facciate ventilate, e quindi dell'effetto camino che si potrebbe venire a formare nell'intercapedine d'aria ventilata, una delle opzioni per contrastare questo problema sarebbe quella di interrompere la cavità d'aria (e l'isolamento termico, se combustibile). A tal fine è possibile suddividere l'intercapedine utilizzando delle strisce orizzontali non combustibili, resistenti alla corrosione, e posizionate con una pendenza del 5 % in modo tale da consentire all'acqua di defluire verso l'esterno.

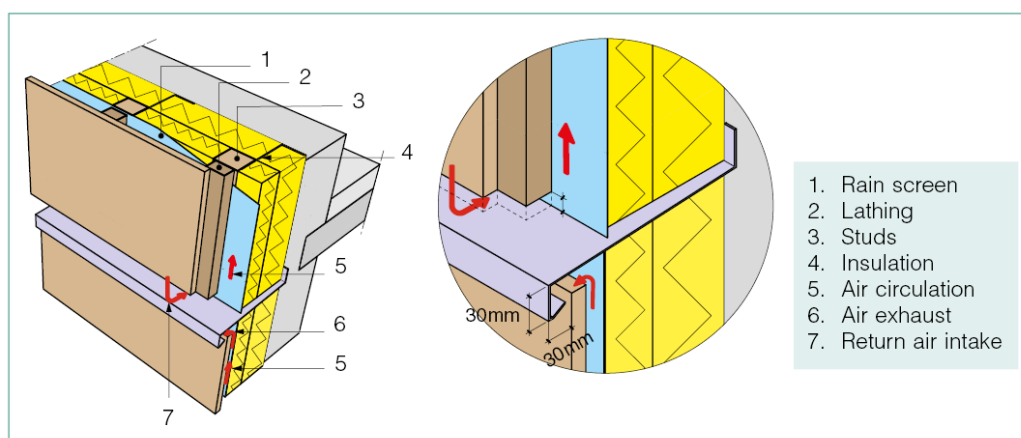


Figura 29 – Barriera tagliafuoco di intercapedine che interrompe anche l'isolante, se combustibile.

Esistono anche dei dispositivi che interrompono l'intercapedine solo in caso di incendio, come ad esempio dei prodotti intumescenti resistenti all'acqua; la cavità d'aria rimane così ventilata in circostanze normali.

Croazia

L'Università di Zagabria ha sviluppato un manuale intitolato "Sicurezza antincendio delle facciate negli edifici – Manuale per progettisti, architetti, ingegneri ed esperti del fuoco" che, dopo un inquadramento normativo nazionale, riporta delle soluzioni progettuali per sistemi a cappotto e facciate ventilate combustibili. Nel documento viene inquadrato in modo esplicito il tema delle prestazioni energetiche degli edifici, dichiarando che "la richiesta di strati di isolamento termico più spessi implica allo stesso tempo anche un maggiore carico d'incendio degli edifici. L'utilizzo di isolanti combustibili, in caso di incendio, aumenta il rischio di propagazione del fuoco agli edifici adiacenti ed ai piani superiori, con anche un impatto negativo sull'ambiente a causa dell'emissione di grandi quantità di fumo".

Gli scenari prefigurati nel documento non sono molto differenti da quelli analizzati nel documento belga, e risultano essere:

- Propagazione dell'incendio esterno per irraggiamento, dall'edificio contiguo separato alla facciata combustibile;
- Propagazione dell'incendio esterno lungo la facciata combustibile da fonti di incendio poste nelle vicinanze della costruzione stessa, per irraggiamento oppure per esposizione diretta alle fiamme (rifiuti sui balconi, autovetture parcheggiate, ecc.);
- Incendio interno all'edificio, che si propaga attraverso le aperture presenti in facciata (finestre, porte, ecc.) verso i piani superiori.

Viene evidenziato che la protezione rispetto alla propagazione del fuoco attraverso le facciate ventilate è un problema complesso, dal momento che nella prassi non esiste un principio generale applicabile a tutti i sistemi di facciate ventilate, come invece nel caso dei sistemi a cappotto. Infatti, il requisito di ventilazione naturale dell'aria attraverso l'intercapedine e quello di prevenzione della propagazione del fuoco all'interno dello stesso corridoio d'aria, sono tra loro in contrapposizione. La protezione si ottiene inserendo le barriere antincendio, cioè componenti del sistema che limitano la propagazione dell'incendio attraverso l'intercapedine interrompendo o riducendo la sezione trasversale libera.

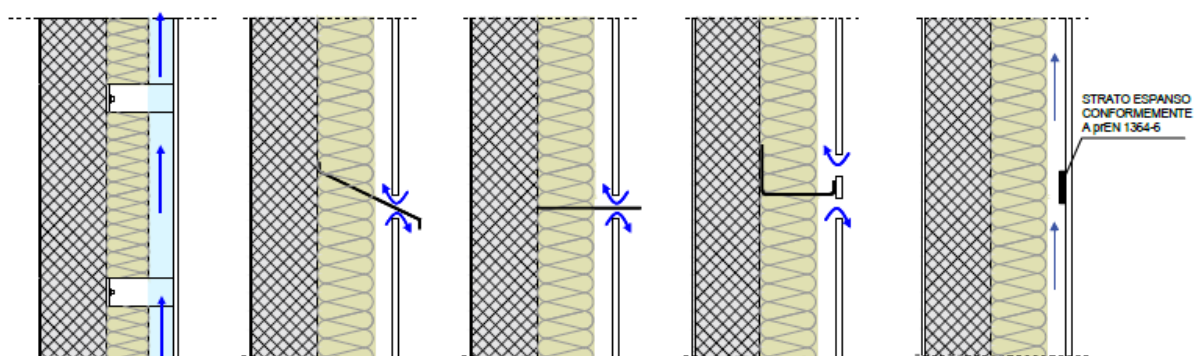


Figura 30 – Varie tipologie di barriere antincendio di intercapedine.

Inoltre, uno dei metodi consiste nell'inserimento di un elemento espansivo che, in caso di incendio, aumenta il proprio volume chiudendo la cavità nella zona del corridoio d'aria. In ogni caso, all'atto della realizzazione delle barriere nelle facciate ventilate bisogna attenersi alle istruzioni del produttore che è tenuto a documentare la qualità di questi sistemi.

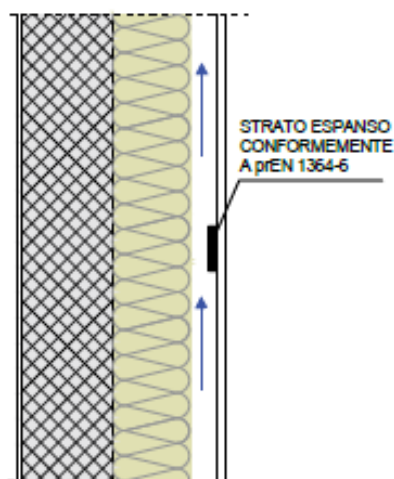


Figura 31 – Esempio di barriera tagliafuoco di intercapedine costituita da materiale termo-espandente.

Nella prassi è stato dimostrato che l'unico modo possibile per provare l'efficienza delle barriere per la prevenzione alla propagazione del fuoco nei sistemi complessi è effettuare il test delle facciate in larga scala, che non sono riconosciuti secondo la normativa croata vigente.

Infine, il documento fornisce una serie di problemi pratici e di utili raccomandazioni, e rappresenta certamente uno tra i documenti che meglio rispondono alla problematica in questione.

Spagna

In generale, il quadro normativo spagnolo per quanto riguarda la sicurezza antincendio delle facciate degli edifici pubblici e privati, con permanenza di persone, stabilisce che la classificazione di reazione al fuoco deve essere minimo B-s3, d2.

Il Real Decreto RD 732/2019 del 20 dicembre ha modificato i requisiti del Documento Basico di Sicurezza in caso di Incendio CTE DB-SI del Código Técnico de la Edificación (CTE). Il nuovo CTE modifica quindi i requisiti di resistenza al fuoco dei sistemi di costruzione di facciate esterne e pareti divisorie, che

influiscono direttamente sull'isolamento termico dei rivestimenti e delle facciate ventilate.

A partire dal 28 giugno 2020, quando è entrato in vigore questo nuovo CTE, tutti gli edifici di nuova costruzione o quelli in cui si va a ristrutturare l'esterno della facciata, devono soddisfare i seguenti requisiti nell'area interessata:

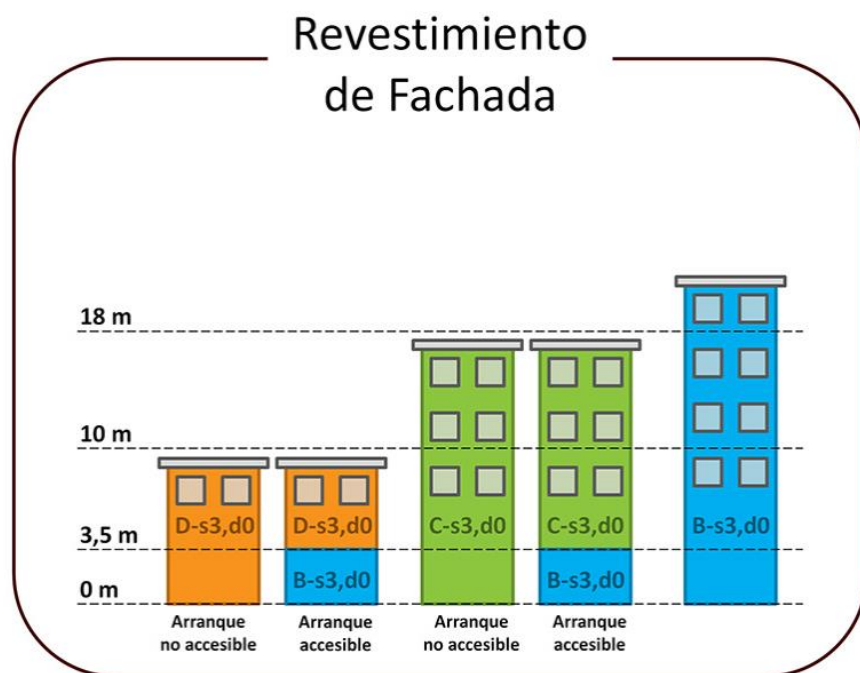


Figura 32 – Valori di reazione al fuoco del rivestimento di facciata a seconda dell'altezza dell'edificio.

La classe di reazione al fuoco dei sistemi costruttivi di facciata che occupano più del 10 % della superficie sarà, a seconda della altezza totale della facciata:

- D-s3, d0 in facciate di altezza fino a 10 m;
- C-s3, d0 in facciate di altezza fino a 18 m;
- B-s3, d0 in facciate di altezza superiore a 18 m.

Questa classificazione deve considerare la condizione di uso finale del sistema costruttivo, includendo quei materiali che costituiscono strati contenuti

all'interno della soluzione di facciata e che non sono protetti da uno strato che sia almeno EI 30.

Nel caso specifico di facciate ventilate, i requisiti proposti dal nuovo CTE riguardanti l'isolamento posto all'interno dell'intercapedine di ventilazione, in funzione dell'altezza della facciata, sono i seguenti:

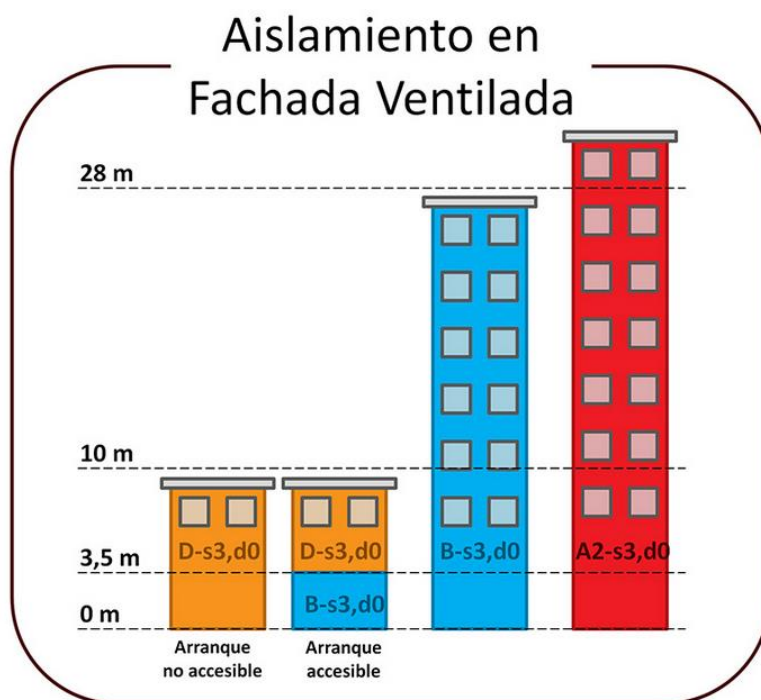


Figura 33 – Valori di reazione al fuoco dell'isolante a seconda dell'altezza dell'edificio.

I sistemi di isolamento situati all'interno della camera ventilata devono avere almeno la seguente classificazione di reazione al fuoco a seconda dell'altezza totale della facciata:

- D-s3, d0 in facciate di altezza fino a 10 m;
- B-s3, d0 in facciate di altezza fino a 28 m;
- A2-s3, d0 in facciate di altezza superiore a 28 m.

Fra le altre, vengono riportate le soluzioni di isolamento termico più utilizzate per intercapedini ventilate che soddisfano tali requisiti:

Soluzioni di materiali isolanti in facciate ventilate *	D-s3, d0	B-s3, d0	A2-s3, d0
Pannello in lana minerale	Si	Si	Si
Pannello in poliuretano	Si		
Poliuretano ignifugo spruzzato	Si		
Poliuretano spruzzato + intonaco	Si	Si	
Intonaco isolante con EPS	Si	Si	
Intonaco isolante con lana minerale	Si	Si	Si
Intonaco isolante con sughero	Si	Si	Si

Queste soluzioni sono generiche ed orientative. Sarà comunque sempre necessario verificare la reazione al fuoco del prodotto con una Dichiarazione di Prestazioni originale e aggiornata.

Figura 34 – Tabella con le soluzioni di isolamento termico più utilizzate in intercapedine, con relativi valori di reazione al fuoco.

Bisogna limitare lo sviluppo in verticale dell'intercapedine ventilata di facciata in continuità con i solai resistenti al fuoco che separano i vari compartimenti. L'inserimento di barriere E 30 può essere considerato una valida procedura per limitare tale sviluppo verticale.

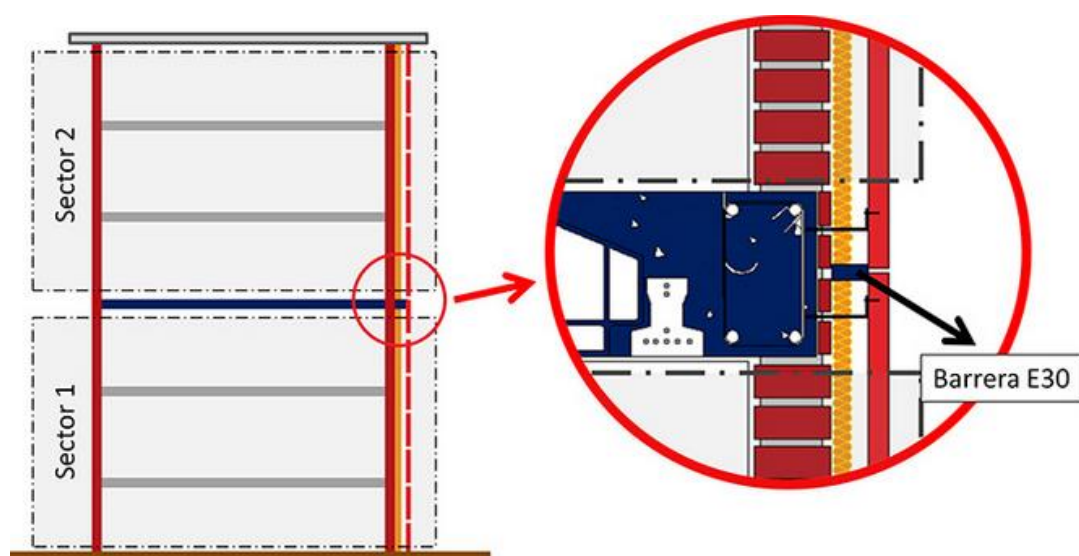


Figura 35 – Barriera antincendio di intercapedine con tenuta E 30.

Esistono due famiglie di barriere E 30: barriere non intumescenti e barriere intumescenti.

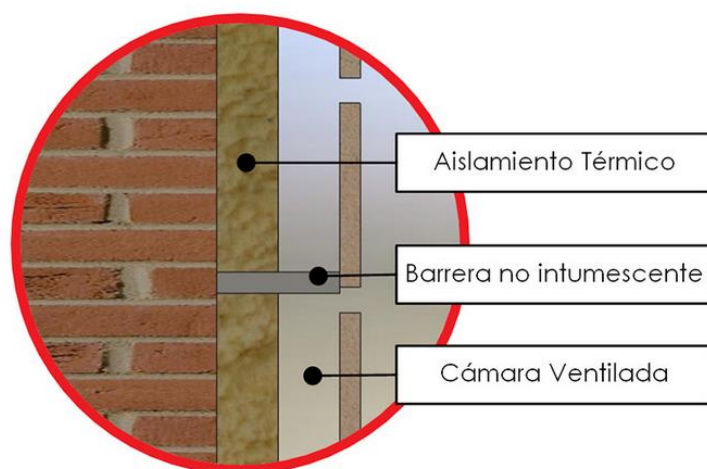


Figura 36 – Barriera di intercapedine non intumescente.

Le barriere E 30 non intumescenti consistono in una barriera che interrompe la ventilazione dell'intercapedine. Possono essere formate da uno dei seguenti materiali:

- Metallo di, almeno, 0,50 mm di spessore;
- Legno di, almeno, 38 mm di spessore;
- Lana di roccia, installata sotto compressione;
- Lastre in calcio silicato, cemento o gesso, di almeno 12 mm di spessore.

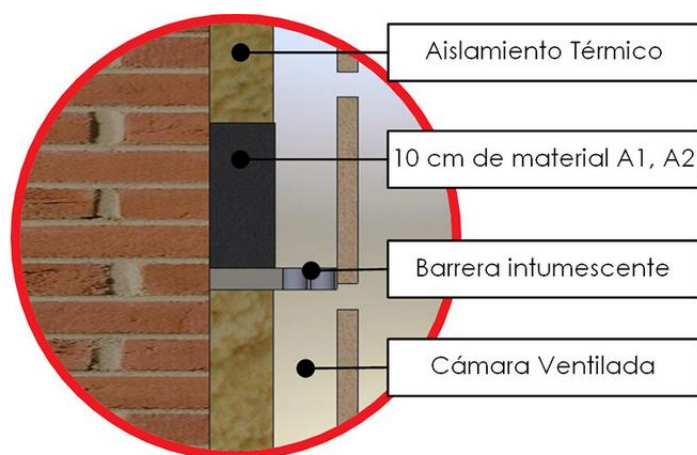


Figura 37 – Barriera di intercapedine intumescente, con applicazione sopra di essa di uno strato incombustibile di 10 cm.

Le barriere E 30 intumescenti consistono in una lamina perforata che permette la ventilazione della camera e che si chiude in presenza di un incendio. Devono essere installate con una fascia di materiale non combustibile di almeno 10 cm, al di sopra di tale barriera.

Regno Unito e Irlanda

Ci sono diverse regolamentazioni in tema di sicurezza antincendio per quanto riguarda Inghilterra, Galles, Scozia, Irlanda del Nord e Repubblica d'Irlanda; tuttavia, i requisiti riguardanti i sistemi di facciata sono molto simili in tutti questi paesi.

Inoltre, vi è una linea guida differente a seconda che l'edificio sia residenziale o meno e a seconda della possibilità di avere un livello di rischio maggiore legato al tipo di occupazione, come nel caso di scuole ed ospedali per cui è richiesta l'adozione di ulteriori misure.

Altri requisiti entrano in gioco per edifici di altezza superiore ai 18 m, considerando i soli piani abitabili (non vengono cioè considerati i locali tecnici ed i sottotetti).

All'interno di ogni regolamentazione sono fornite disposizioni relativamente alla reazione al fuoco e ai test d'incendio, secondo standard europei e britannici, come EN 13501 e BS 476.

L'obiettivo principale di questi test e queste norme è la salvaguardia della vita in caso di incendio.

Le norme cogenti applicabili ai sistemi di isolamento di facciata sono:

- Part B, Fire Safety, of Schedule 1 to the Building Regulations, 2010, in Inghilterra e Galles;

- Regulation 9 of Schedule 5, Section 2 – Fire to the Building Standards, 2015, in Scozia;
- Part E of regulation 2 of the Building Regulations, 2012, in Irlanda del Nord;
- Building Regulations, 2006: Technical Guidance Document B Fire Safety under Article 7 of the Building regulation, in Irlanda.

Nello specifico, nel documento “Approved Document B – The Building Regulation, 2018”, si parla in modo piuttosto dettagliato delle “cavity barriers”, ovvero delle barriere tagliafuoco da utilizzare nelle intercapedini. Infatti, gli spazi e cavità nascoste in una costruzione costituiscono una via di diffusione di fumi e fiamme, per questo vengono installati questi sistemi. Inoltre, ogni cavity barrier dovrebbe garantire una resistenza al fuoco di almeno 30 minuti.

Una cavity barrier può essere costituita da:

- a. Metallo con spessore di almeno 0,5 mm;
- b. Legno con spessore di almeno 38 mm;
- c. Lana minerale con guaina in politene, o lastra di lana minerale, sotto compressione;
- d. Calcio silicato (EI 60), lastre a base di cemento o gesso, di spessore di almeno 12 mm.

Infine, la smoke barrier non deve perdere efficacia in caso di cedimenti dell’edificio, dilatazioni termiche, azioni del vento o altre azioni esterne. Essa non deve collassare in caso di cavi impiantistici infiammati che la attraversano, ecc.

Ulteriori linee guida, sviluppate per edifici con maggiori criticità, come appunto scuole ed ospedali, si possono trovare in:

- British Standard BS 9999:2017 – Fire Safety in the design, management and use of buildings, code of practice;

- BB100 Designing against the risk of fire in schools;
- HTM 05-02:2014: Fire Safety in design of healthcare premises.

La linea guida nazionale definisce i requisiti di reazione al fuoco per i materiali presenti sotto i 18 m di altezza, secondo la classificazione nazionale contenuta nella BS 476 o quella europea contenuta nella EN 12501.

Per edifici oltre i 18 m, vengono previste tre possibili vie, per conformarsi relativamente ai sistemi di facciata:

- Performance Route: questa possibilità prevede che i sistemi di facciata debbano soddisfare i criteri di prestazione stabili dalla BR 135 quando testati con la BS 8414, oppure deve essere condotto uno studio da parte di uno specialista antincendio che vada ad indicare se, a suo parere, i criteri della BR 135 sono soddisfatti dal sistema proposto;
- Linear-based Route: come via alternativa, per conformarsi, richiede di soddisfare i paragrafi dal 12.6 al 12.9 del Approved Document B. Con specifico riferimento ai materiali di isolamento, è previsto, ad esempio, che “in un edificio con altezza superiore ai 18 m, ogni isolante ecc. utilizzato esternamente alle murature delle costruzioni, deve essere a limitata combustibilità”;
- Fire Safety Engineering Route: questa via è basata su principi scientifici in un’ottica di progettazione integrata. La FSE non considera solo la struttura ed i materiali esposti al fuoco, ma include anche gli aspetti circa il comportamento umano, le misure di prevenzione attive e passive, l’adeguatezza delle misure di rilevazione e allarme, di contenimento e di estinzione dell’incendio, ecc.

Paese	AUSTRIA	BELGIO	CROAZIA	SPAGNA	REGNO UNITO & IRLANDA
Obiettivi principali	<p>Limitare la propagazione del fuoco;</p> <p>Limitare la caduta di parti di facciata</p>	<p>Fornire una panoramica dell'attuale quadro normativo riguardante la sicurezza antincendio e il rischio di incendio delle facciate;</p> <p>Delineare i punti chiave e le caratteristiche costruttive che garantiscono la corretta progettazione e installazione dei sistemi di facciata comunemente usati</p>	-	-	Salvaguardia della vita in caso di incendio
Scenari di incendio	Incendio completo all'interno che si propaga in facciata	<p>Fuoco diffuso attraverso la superficie del rivestimento della facciata;</p> <p>Fuoco diffuso da un compartimento all'altro;</p> <p>Fuoco diffuso all'interno del sistema di facciata attraverso componenti combustibili</p>	<p>Propagazione di un incendio dall'esterno (edificio contiguo) per irraggiamento;</p> <p>Propagazione di un incendio lungo la facciata combustibile, da fonti di incendio poste nelle vicinanze della costruzione stessa, per irraggiamento oppure per esposizione diretta alle fiamme;</p> <p>Incendio interno all'edificio, che si propaga attraverso le aperture presenti in facciata verso i piani superiori</p>	-	-
Rivestimento di facciata	Non deve rappresentare un carico d'incendio aggiuntivo, non deve favorire la	In edifici bassi (h < 10 m) deve essere di classe D-s3, d1; In edifici di media e	-	La classe di reazione al fuoco dei sistemi costruttivi di facciata che occupano più del 10 % della superficie	-

	propagazione del fuoco e deve impedire il più a lungo possibile alle fiamme di penetrare nell'intercapedine ventilata	alta altezza deve essere di classe B-s3, d1		sarà, a seconda della altezza totale della facciata: -D-s3, d0 in facciate di altezza fino a 10 m; -C-s3, d0 in facciate di altezza fino a 18 m; -B-s3, d0 in facciate di altezza superiore a 18 m.	
Metodologia di approccio	-	Si dividono gli edifici per altezza e si assegna ad ognuna la tipologia di test da eseguire e la classe di reazione al fuoco finale; Per le facciate ventilate, si divide fra non combustibili (A2-s3,d0) e combustibili (in cui vi deve essere una interruzione ogni 2 piani, o con un elemento metallico o con una barriera tagliafuoco)	-	-	La linea guida nazionale definisce i requisiti di reazione al fuoco per i materiali presenti sotto i 18 m di altezza; Per edifici oltre i 18 m, la linea guida prevede tre possibili vie per conformarsi relativamente ai sistemi di facciata: Performance Route, Linear-based Route, Fire Safety Engineering Route
Materiale isolante	-	-	-	I sistemi di isolamento situati all'interno della camera ventilata devono avere almeno la seguente classificazione di reazione al fuoco a seconda dell'altezza totale della facciata: -D-s3, d0 in facciate di altezza fino a 10 m; -B-s3, d0 in facciate di altezza fino a 28 m; -A2-s3, d0 in facciate di altezza superiore a 28 m.	-
Cavity barriers	Barriere tagliafuoco	Interrompere la cavità d'aria (e l'isolamento)	Barriere metalliche, o inserimento di un elemento espansivo che, in caso di	Barriere E30, intumescenti (lamina perforata che	Ogni cavity barrier dovrebbe garantire

	<p>verticali o orizzontali;</p> <p>Si considera soddisfatto il requisito di protezione contro la propagazione del fuoco, senza necessità di ulteriori prove, se la barriera tagliafuoco è costituita da un profilo continuo in lamiera di acciaio con uno spessore minimo di 1 mm, o da uno, equivalente in termini di protezione antincendio, a sbalzo di almeno 20 cm;</p> <p>Devono essere applicate in corrispondenza di ogni piano dell'edificio</p>	<p>termico, se combustibile);</p> <p>Suddividere l'intercapedine utilizzando delle strisce orizzontali non combustibili, resistenti alla corrosione, e posizionate con una pendenza del 5 % in modo tale da consentire all'acqua di defluire verso l'esterno;</p> <p>Esistono anche dei dispositivi che interrompono l'intercapedine solo in caso di incendio, come ad esempio dei prodotti intumescenti resistenti all'acqua, la cavità d'aria rimane così ventilata in circostanze normali</p>	<p>incendio, aumenta il proprio volume chiudendo la cavità nella zona del corridoio d'aria</p>	<p>permette la ventilazione della camera e che si chiude in presenza di un incendio, installate con una fascia di materiale non combustibile di almeno 10 cm sopra di esse) o non intumescenti (in metallo di almeno 0,50 mm di spessore, in Legno di almeno 38 mm di spessore, in lana di roccia, installata sotto compressione, o lastre in calcio silicato, cemento o gesso, di almeno 12 mm di spessore)</p>	<p>una resistenza al fuoco di almeno 30 minuti;</p> <p>Una cavity barrier può essere costituita da:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Metallo con spessore di almeno 0,5 mm; -Legno con spessore di almeno 38 mm; -Lana minerale con guaina in politene, o lastra di lana minerale, sotto compressione; -Calcio silicato (EI 60), lastre a base di cemento o gesso, di spessore di almeno 12 mm
--	---	--	--	--	---

Figura 38 – Tabella riassuntiva delle normative internazionali riguardanti la sicurezza al fuoco delle facciate ventilate.

1.7.2 Misure di protezione antincendio per facciate ventilate

Per quanto riguarda il caso di facciate ventilate che presentano aperture di facciata in vetro, bisogna attuare le seguenti misure di protezione delle facciate:

- Protezione del sistema di facciata con componenti/materiali di finitura;
- Interruzione ritmica dell'intercapedine verticale all'interno del sistema di facciata;
- Componenti/materiali di isolamento termico;
- Protezione del contorno della cavità vetrata o non protetta;

- Utilizzo di parapetti di almeno 1,20 m di altezza, ignifughi E30, in prossimità di pavimenti di altezza pari ad almeno 0,50 m, E30.

A tale proposito, è possibile configurare alcune soluzioni che possono ridurre la diffusione dell'incendio attraverso l'intercapedine tramite l'inserimento di appositi elementi tagliafuoco.



Figura 39 – Esempio di barriera di intercapedine continua.

In generale, quando viene installato un sistema di facciata ventilata, è necessario, sia nel caso di isolante combustibile che non, prevenire la diffusione dell'incendio lungo la camera di ventilazione tramite le aperture, o almeno a piani alternati lungo tutto il perimetro dell'edificio.

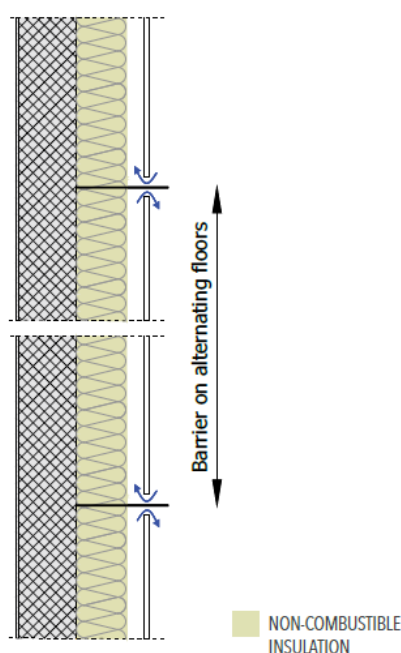


Figura 40 – Posizionamento di barriere di intercapedine a piani alternati.

Un'ulteriore misura di sicurezza al fuoco, oltre all'utilizzo di materiali non infiammabili, è quella di installare delle scatole antincendio costituite da una struttura metallica e fissate alla parete in corrispondenza del perimetro delle aperture di facciata. Lo spazio fra gli elementi metallici viene riempito con una lana minerale resistente al calore. La funzione di queste scatole è quella di non permettere alle fiamme di penetrare all'interno della facciata. Tuttavia, questo sistema non funziona nelle situazioni in cui la fonte di incendio si trova all'esterno dell'edificio. Per questo motivo, vengono posizionate barriere tagliafuoco con un passo definito, in modo da coprire l'intero spessore dell'intercapedine d'aria. In caso di incendio, esse impediscono la diffusione della combustione della membrana antivento e la caduta di particelle infiammate, così come la diffusione di gas infiammabili lungo la parete perimetrale.

Bisogna ora dividere fra facciate ventilate ispezionabili o meno, e con parete esterna aperta o chiusa.

Nel caso di facciate ventilate non ispezionabili, in cui la camera ventilata ha uno spessore dai 3 ai 60 cm, con parete esterna chiusa, se l'intercapedine è dotata, in corrispondenza di ogni vano finestra e/o porta-finestra e in corrispondenza di ogni solaio, di elementi di interruzione non combustibili e che si mantengono integri durante l'esposizione al fuoco, la parete interna deve obbedire alle stesse regole delle facciate semplici, utilizzando delle fasce orizzontali. Non sono richiesti gli elementi orizzontali di interruzione in corrispondenza dei solai se nell'intercapedine è presente esclusivamente materiale isolante classificato almeno B-s3, d0, ovvero se la parete interna ha, per l'intera altezza e per tutti i piani, una resistenza al fuoco EI 30.

Nel caso di facciate ventilate non ispezionabili con parete esterna aperta, cioè costituita, per almeno il 50 % della sua superficie, da giunti, griglie fisse o mobili, che si aprono automaticamente in caso di incendio di almeno 60°, o da pannelli realizzati con materiale che a temperature inferiori a 200 °C si rompono e cadono, la parete interna dovrà presentare analoghi requisiti di resistenza al fuoco delle facciate semplici, se nell'intercapedine è presente esclusivamente materiale isolante classificato almeno B-s3, d0, ovvero dovrà avere, per l'intera altezza e per tutti i piani, una resistenza al fuoco EI 30 se nell'intercapedine è presente materiale isolante con classificazione di reazione al fuoco inferiore.

Nel caso di facciate ventilate ispezionabili, in cui la camera ventilata è di spessore superiore a 60 cm, con parete esterna chiusa, se l'intercapedine è interrotta da solai o setti di compartimentazione E60 per ciascun piano, la parete esterna ovvero la parete interna devono obbedire alle stesse regole delle facciate semplici. Nei solai e setti resistenti al fuoco che interrompono l'intercapedine, possono essere praticate aperture allo scopo di consentire la circolazione di aria all'interno dell'intera intercapedine, a condizione che sia mantenuta salva la continuità della compartimentazione di interpiano attraverso l'intervento, in caso d'incendio, di dispositivi automatici di chiusura aventi requisito di resistenza al fuoco E60. Invece, se l'intercapedine è priva di interruzioni orizzontali, la parete interna dovrà avere, per l'intera altezza e per tutti i piani, una resistenza al fuoco EW30.

Infine, nel caso di facciate ventilate ispezionabili con parete esterna aperta, la parete interna dovrà presentare analoghi requisiti di resistenza al fuoco delle facciate semplici.

In alternativa o in aggiunta a tali prescrizioni, è possibile dotare la facciata di un sistema automatico di spegnimento ad acqua, posizionato all'interno

dell'intercapedine. L'impianto deve essere comandato da apposito sistema di rivelazione incendi a servizio di ciascun piano dell'edificio, e i dispositivi di erogazione, posti al di sopra di ciascun piano, devono essere orientati verso la parete interna. Lo spazio intermedio o "corridoio d'aria", inoltre, dovrà essere provvisto di un sistema di evacuazione dei fumi, orientativamente individuabile attraverso una superficie di ventilazione naturale, realizzata sia nella parte bassa che nella parte alta della facciata, di area pari al 10 % della sezione orizzontale dell'intercapedine stessa.

Tali misure migliorano drasticamente la sicurezza antincendio delle facciate ventilate che, molto spesso, presentano un incontrollato rischio di incendio che può essere pericoloso in determinate condizioni. Questo è principalmente dovuto al fatto che, in un edificio alto con sistema di facciata ventilata, vi è il pericolo che i fumi ed i gas caldi provenienti da un incendio possano diffondersi attraverso le fessure esistenti in facciata, e possano poi accumularsi e diffondersi orizzontalmente o verticalmente in altri spazi che presentano aperture relative allo spazio fra le facciate, ai fini della ventilazione naturale. Le condizioni di comportamento al fuoco e le misure di sicurezza, i materiali e le attrezzature utilizzate nella progettazione e realizzazione dei sistemi di facciata ventilata, devono essere quindi determinati in modo molto accurato e riportati nella documentazione tecnica da parte di progettisti specializzati in sicurezza antincendio.

1.7.3 Efficienza dell'intercapedine con barriere tagliafuoco

Relativamente al funzionamento di barriere tagliafuoco, viene qui riportato un caso studio in cui si è testato il comportamento di una facciata ventilata che presenta: tre tipi diversi di intercapedine (a ventilazione bassa: 7 cm, media: 17 cm, alta: 7 cm + flusso d'aria forzato), due diverse tipologie di barriera

tagliafuoco (di pavimento e di apertura) e isolamento termico con materiale sia combustibile che non.

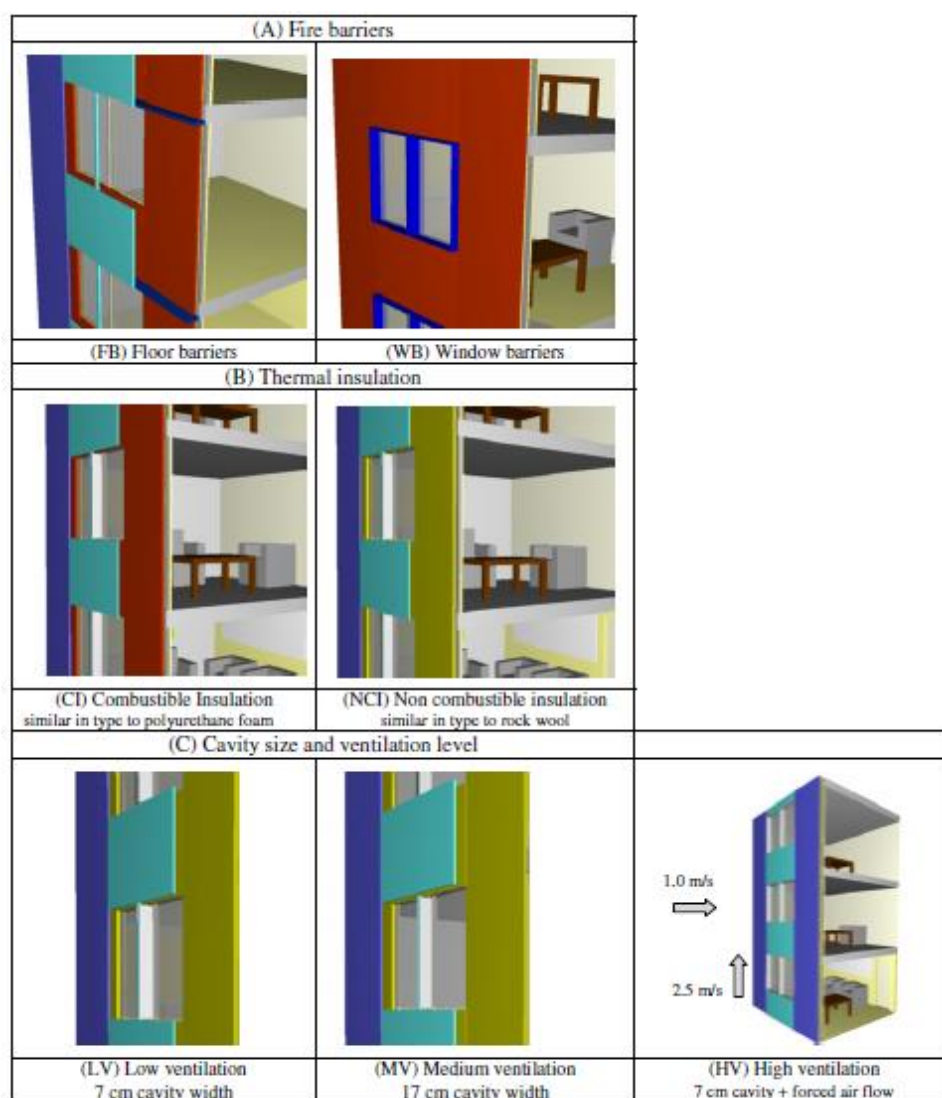


Figura 41 – Schema riassuntivo del caso studio, considerando due diversi tipi di barriere tagliafuoco, due tipologie differenti di isolamento termico, e tre spessori di intercapedine.

Analizzando l'evoluzione termica, quando vengono utilizzate le barriere si registrano picchi sulla superficie della facciata a temperature leggermente inferiori; inoltre, in questo caso, le temperature all'interno della cavità sono significativamente più basse. Questo dimostra che, prevenendo il passaggio del fuoco lungo la cavità ventilata, diminuisce di molto la possibilità che si verifichi la propagazione dell'incendio ai piani superiori.

In generale, si può dire che entrambe le tipologie di barriere tagliafuoco sono efficaci nel prevenire la diffusione dell'incendio. Si deve però considerare che le barriere di pavimento hanno l'ulteriore vantaggio di limitare il passaggio delle fiamme attraverso la camera, mentre le barriere di finestra limitano esclusivamente l'ingresso e l'uscita del fuoco attraverso i telai delle aperture. Questo aspetto è molto importante dal momento che l'interno della cavità potrebbe raggiungere temperature molto alte.

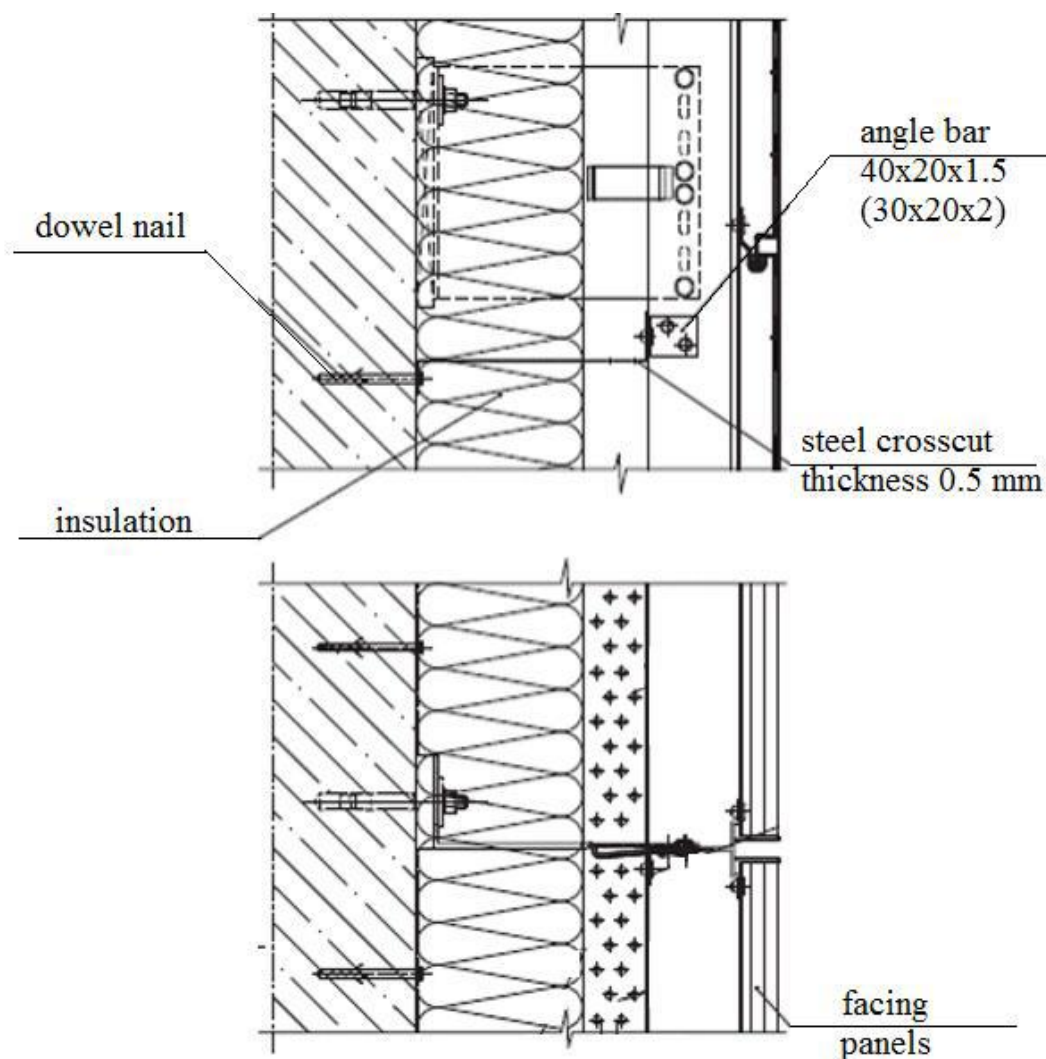
Le barriere tagliafuoco posizionate sui telai delle aperture sono perfette al fine di prevenire il passaggio del fuoco da un compartimento alla cavità ventilata e viceversa. Tuttavia, dal momento che non impediscono il passaggio del fuoco attraverso la camera, non sono efficaci nel prevenire il danneggiamento dell'intercapedine e della sottostruttura causato dal fuoco, mentre le barriere che dividono la cavità in altezza sono più efficaci a questo scopo.

Detto questo, è fondamentale utilizzare appropriate barriere tagliafuoco che, allo stesso tempo, permettano all'intercapedine ventilata di funzionare in modo adeguato in circostanze normali, senza andare a compromettere la performance igro-termica della facciata.

Passando poi alla questione del tipo di isolante termico, nello scenario di isolamento non combustibile, i picchi di temperatura raggiungono gli 800 °C, mentre sono di circa 1000 °C quando si ha isolamento combustibile.

Inoltre, bisogna considerare la geometria della cavità ventilata: più l'intercapedine si sviluppa in altezza, più è probabile che l'incendio si sviluppi lungo la cavità, a prescindere che il materiale sia combustibile o meno; e più grande è lo spessore della camera, più alta è la possibilità di propagazione dell'incendio ai piani superiori.

Tornando alle barriere tagliafuoco di intercapedine, anche dette “cavity barriers”, esse possono essere costituite da piastre metalliche (solide o perforate) in lamiera d’acciaio, con uno spessore minimo di 0,6 mm e posizionate ad una distanza minima di 6 m fra un elemento e un altro, verticalmente. Dal momento che questi dispositivi devono adattarsi perfettamente alla facciata una volta installati, viene annullata la funzione di ventilazione dell’intercapedine d’aria.



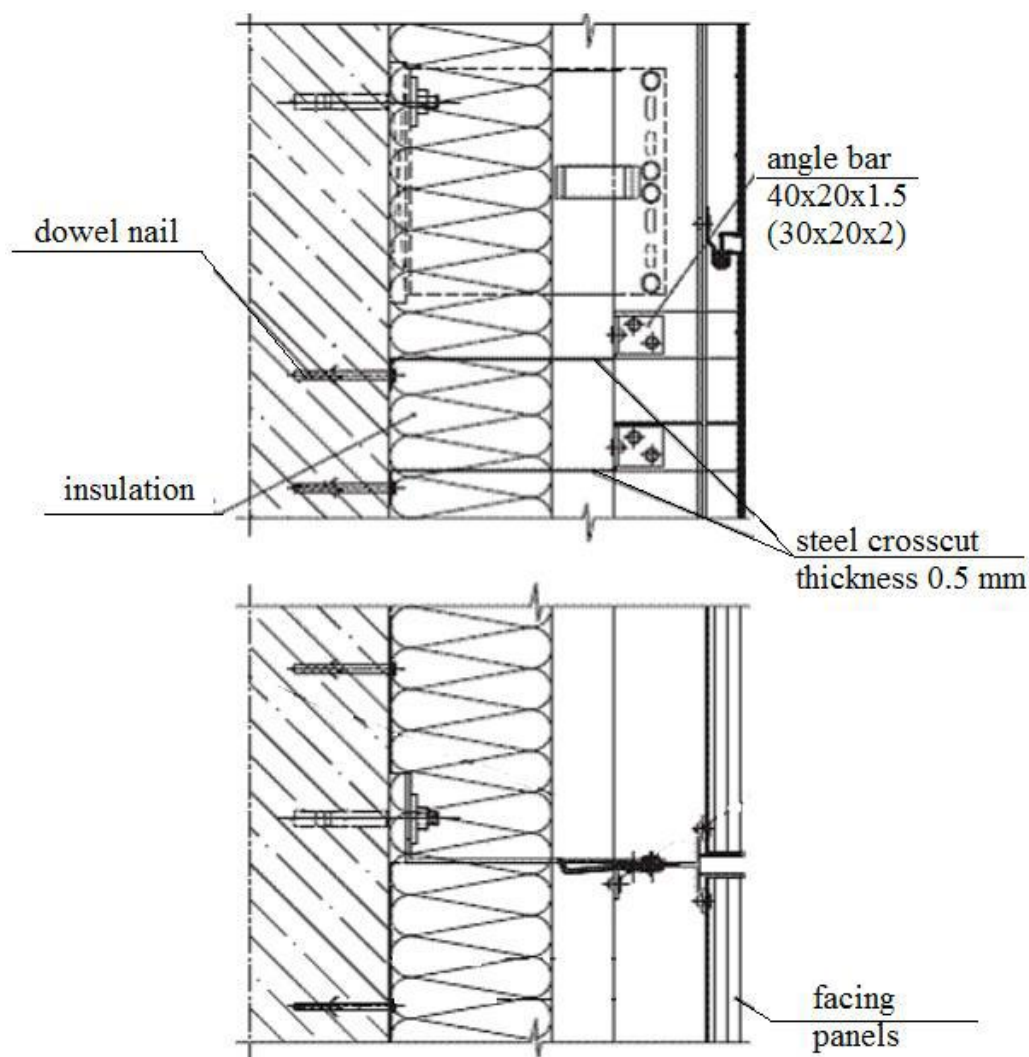


Figura 42 – Diverse soluzioni tecniche per barriere tagliafuoco di intercapedine.

Infatti, quando vengono utilizzate tali barriere, anche se perforate, il ruolo dell'intercapedine di aria viene ridotto a zero, e la facciata smette di funzionare come ventilata. Con una dimensione della camera relativamente piccola, pari ad esempio a 60 mm, la velocità del flusso d'aria scende a zero e non si verifica la circolazione dell'aria, con ulteriore aumento della cavità.

Da un lato, questo dimostra che le barriere funzionano effettivamente ed efficacemente come metodo di prevenzione della diffusione di vapori caldi e infiammabili lungo la facciata; ma dall'altro lato, esse interferiscono con la normale convezione dell'aria all'interno della facciata ventilata.

Si può concludere che la soluzione più razionale sarebbe quella di utilizzare fasce di materiali incombustibili o di installare un sistema ad “espulsione” automatica delle barriere in caso di incendio. Quest’ultimo potrebbe essere così realizzato: nella progettazione della facciata bisogna includere degli anemometri termici che registreranno gli aumenti di temperatura oltre un certo limite; in caso di incendio, il segnale viene trasmesso dall’anemometro al sistema di controllo remoto delle barriere, e queste ultime si attivano posizionandosi trasversalmente all’intercapedine.

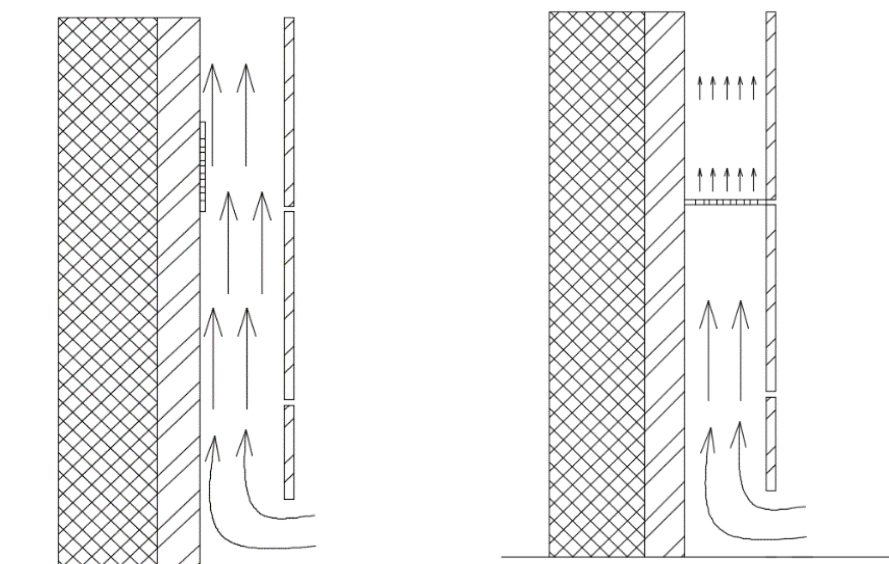


Figura 43 – Funzionamento dell’intercapedine ventilata in presenza di barriere tagliafuoco ad espulsione automatica.

1.8 Esempi di grandi incendi in diversi tipi di facciata

I seguenti esempi riportano un’analisi delle cause e della diffusione delle fiamme in vari sviluppi di incendi, con lo scopo di dimostrare che le conseguenze sarebbero potute essere molto meno gravi se le facciate fossero state progettate ed eseguite in modo adeguato.

1.8.1 Incendio in un edificio di appartamenti a Miskolc, Ungheria

A Miskolc in Ungheria, il 15 agosto del 2009, l’incendio in questione è partito in una cucina del sesto piano di un palazzo di appartamenti di 10 piani, e si è diffuso

verticalmente lungo la facciata a cappotto fino al tetto. L'edificio era stato costruito nel 1968 e ristrutturato nel 2007. Questa ristrutturazione includeva la facciata con il sistema a cappotto, con isolante in polistirene, un materiale molto combustibile. Durante l'incendio, il fumo si è diffuso velocemente attraverso il vano scala e i cavedi impiantistici, che non erano stati isolati in modo appropriato. I seguenti fattori hanno contribuito alla rapida diffusione dell'incendio:

- Essendo in estate, vi erano le finestre aperte e questo ha facilitato la veloce diffusione dell'incendio lungo la facciata fino ai piani superiori;
- L'isolamento in polistirene sulle pareti esterne era stato installato senza prevedere barriere al fuoco con materiale isolante non combustibile;
- Installazione dell'isolamento non adeguata, come ad esempio i pannelli in polistirene che non erano adeguatamente fissati alle pareti;
- 2-3 mm di intonaco, invece che 5 mm.



Figura 44 – Incendio lungo la facciata a cappotto, a Miskolc in Ungheria.

1.8.2 Incendio in un Hostel di Dijon, Francia

Si tratta di un incendio che, il 14 novembre 2010, è partito da un bidone dell'immondizia per poi diffondersi velocemente in verticale lungo la facciata di un ostello di 9 piani. Il forte vento sicuramente ha contribuito alla rapida diffusione del fuoco, dal momento che "ha spinto" le fiamme lungo la facciata. Si pensa che la facciata fosse costituita da un sistema a cappotto, ma la documentazione dettagliata dell'analisi riguardo cause e dinamica dell'incendio non sono ancora state pubblicate.



Figura 45 – Propagazione dell'incendio lungo la facciata, a Dijon in Francia.

1.8.3 Incendio del Centro Televisivo Culturale Di Beijing

L'incendio in questione si è sviluppato il 9 febbraio 2009 in un edificio non ancora terminato alto 159 m (32 piani). Si trattava di una torre principale e due ali angolari sui lati est ed ovest. La torre presentava una facciata continua in vetro a nord e a sud, mentre il rivestimento delle facciate ad est e ad ovest era realizzato con pannelli in lega zinco-titanio, con riempimento di polistirene estruso (XPS) ed uno strato d'aria fra il rivestimento e l'isolamento termico. A quanto descritto da fonti disponibili, l'incendio è partito dal tetto, causato da

lavori di saldatura illegali; infatti, le scintille generate dalla saldatura hanno raggiunto i pannelli di metallo e hanno incendiato lo strato di isolante in XPS. A questo punto, particelle ardenti prodotte dall'XPS in fiamme hanno iniziato a cadere dal tetto e hanno causato la diffusione dell'incendio lungo la facciata fino ai piani più bassi. A causa del forte vento, tutta la torre si è poi ritrovata in fiamme nell'arco di 20 minuti, e il fuoco si è ovviamente introdotto all'interno dell'edificio.

A differenza dei soliti incendi negli edifici, che partono all'interno e si diffondono all'esterno dai piani più bassi ai più alti, in questo caso si è verificato un procedimento completamente opposto. I materiali isolanti combustibili senza l'utilizzo di barriere al fuoco, e l'uso di materiali inadeguati per il rivestimento di facciate, hanno sicuramente contribuito alla vasta diffusione di questo incendio.



Figura 46 – Propagazione dell'incendio nel Centro Televisivo Culturale di Beijing.

1.8.4 Incendio di un dormitorio per studenti a Zagreb

Questo incendio è iniziato sul tetto di un dormitorio per studenti il 22 febbraio 2017, e si è sviluppato verticalmente lungo la facciata dell'edificio adiacente verso i tre piani successivi. La causa esatta dell'incendio non è ancora chiara. Tuttavia, secondo i fotografi dell'incendio, si può dire che è partito dal tetto

dell'edificio più basso. L'isolamento termico combustibile della facciata e il forte vento sicuramente hanno contribuito alla rapida diffusione delle fiamme e del fumo lungo la facciata.



Figura 47 – Diffusione delle fiamme dal tetto fino in facciata, a Zagreb.

2. Funzionamento dell'impianto fotovoltaico

Normalmente siamo abituati ad osservare impianti fotovoltaici tradizionali applicati in copertura, ma ultimamente si sta sempre di più sviluppando l'utilizzo di tali sistemi anche in facciata, mediante elementi BIPV integrati verticalmente nell'involucro degli edifici. Questo però rischia di aggravare la condizione globale di sicurezza al fuoco di tali costruzioni ed il loro comportamento in caso di incendio, e ciò è da tenere attentamente in considerazione soprattutto nel caso di edifici BIPV con sistema di facciata ventilata; infatti, in questa specifica situazione, al pericoloso "effetto camino" va ad aggiungersi il funzionamento elettrico di questo particolare tipo di sistemi fotovoltaici, che ovviamente può causare fenomeni di sovraccarico e corto circuito, come verrà descritto in maniera dettagliata più avanti.

In generale, un sistema fotovoltaico è "un impianto di produzione di energia elettrica composto dall'insieme di moduli fotovoltaici e da altri componenti tali da consentire di produrre energia elettrica e fornirla alle utenze elettriche e/o di immetterla nella rete del distributore".

Di seguito si riportano una serie di definizioni provenienti dalla Sezione 712 della Norma CEI 64-8 e dalla Guida CEI 82-25, relative ai componenti di un impianto FV:

- Dispositivo fotovoltaico: componente che manifesta l'effetto fotovoltaico, come ad esempio celle, moduli, pannelli, stringhe o l'intero generatore FV;
- Cella fotovoltaica: dispositivo fondamentale in grado di generare elettricità quando viene esposto a radiazione solare;
- Modulo fotovoltaico: il più piccolo insieme di celle fotovoltaiche interconnesse e protette dall'ambiente circostante;

- Pannello fotovoltaico: gruppo di moduli preassemblati, fissati meccanicamente insieme e collegati elettricamente. In pratica è un insieme di moduli fotovoltaici e di altri accessori collegati tra di loro meccanicamente ed elettricamente;
- Stringa fotovoltaica: insieme di pannelli fotovoltaici collegati elettricamente in serie;
- Generatore o Campo FV: insieme di tutti i moduli FV in un dato sistema FV;
- Quadro elettrico di giunzione del generatore FV: quadro elettrico nel quale tutte le stringhe FV sono collegate elettricamente e possono essere situati dispositivi di protezione, se necessario;
- Cavo principale FV in C.C.: cavo che collega il Quadro elettrico di giunzione ai terminali C.C. del convertitore FV;
- Gruppo di conversione della corrente continua in corrente alternata: insieme di inverter (convertitori FV) installati in un impianto fotovoltaico, impiegati per la conversione in corrente alternata della corrente continua prodotta dalle varie sezioni che costituiscono il generatore fotovoltaico;
- Sezione di impianto fotovoltaico: parte del sistema o impianto fotovoltaico, costituito da un gruppo di conversione C.C./C.A. e da tutte le stringhe fotovoltaiche che fanno capo ad esso;
- Cavo di alimentazione FV: cavo che collega i terminali c.a. del convertitore FV con un circuito di distribuzione dell'impianto elettrico;
- Impianto (o Sistema) fotovoltaico: insieme di componenti che producono e forniscono elettricità ottenuta per mezzo dell'effetto fotovoltaico. Esso è composto dal Generatore FV e dagli altri componenti (BOS), tali da

consentire di produrre energia elettrica e fornirla alle utenze elettriche e/o di immetterla nella rete del distributore.

I componenti principali di un impianto FV sono suddivisibili in tre gruppi distinti per funzione e caratteristiche:

- a. le strutture di sostegno e supporto;
- b. i pannelli FV;
- c. i gruppi di conversione od inverter con le relative protezioni di carattere impiantistico elettrico.

I pannelli FV comunemente utilizzati hanno dimensioni che variano tra 0,5 e 1,5 m², anche se ne esistono in commercio di dimensioni superiori a 2 m² che risultano però poco usati. Tali pannelli sono composti da celle, a loro volta realizzate in materiale cristallino, costituite da una lamina di materiale semiconduttore, il più diffuso dei quali è il silicio, che si presenta in genere di colore nero o blu. I moduli possono avere una cornice, solitamente realizzata in alluminio, che facilita il montaggio e costituisce una barriera contro l'infiltrazione di acqua.

I moduli in silicio, mono o policristallini, rappresentano la maggior parte del mercato.

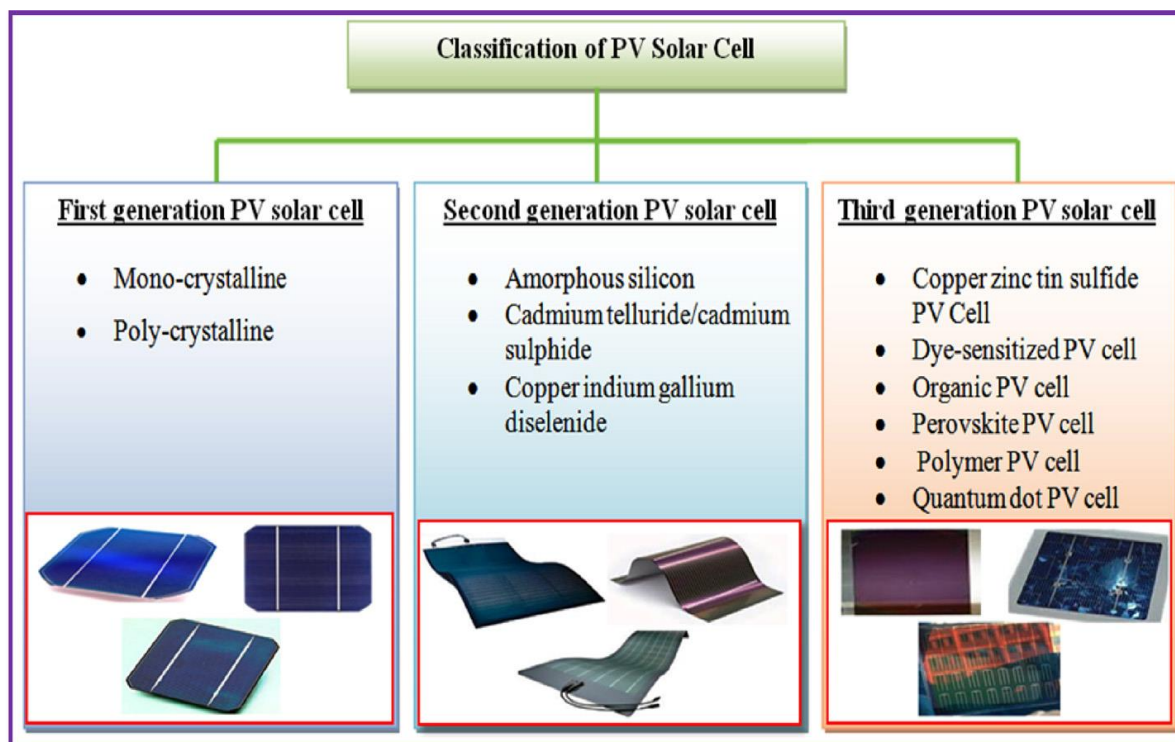


Figura 48 – Schema esplicativo delle tre diverse generazioni delle celle solari.

Riguardo le diverse tipologie di impianti fotovoltaici, si possono trovare impianti FV di tipo fisso, detti “grid connected”, destinati ad operare in parallelo alla rete del distributore di Energia (ENEL od altri), e impianti FV di tipo isolato, detti “stand alone”.

Si parla invece di impianti ad isola quando non vi è l’allaccio alla rete di distribuzione pubblica ma vi sono sempre presenti batterie cariche. Gli impianti ad isola, infatti, sono detti tali in quanto “isolati” dalla rete elettrica; sono autonomi e l’energia prodotta va ad alimentare una batteria ed un alternatore. “Vivono” dell’energia prodotta e sono caratterizzati, in Italia, da tensioni e potenze basse e limitate, generalmente sono a servizio di impianti semaforici o di illuminazione, e sono totalmente indipendenti dalla rete.

Negli impianti FV, i singoli pannelli sono quindi collegati in serie tra loro componendo una stringa che, a sua volta, è messa in parallelo con altre; l’effetto è quello di avere delle stringhe con la medesima tensione, poste in parallelo ad

altre, per ottenere i valori di corrente desiderati, come gli elementi di una batteria di dimensioni ragguardevoli.

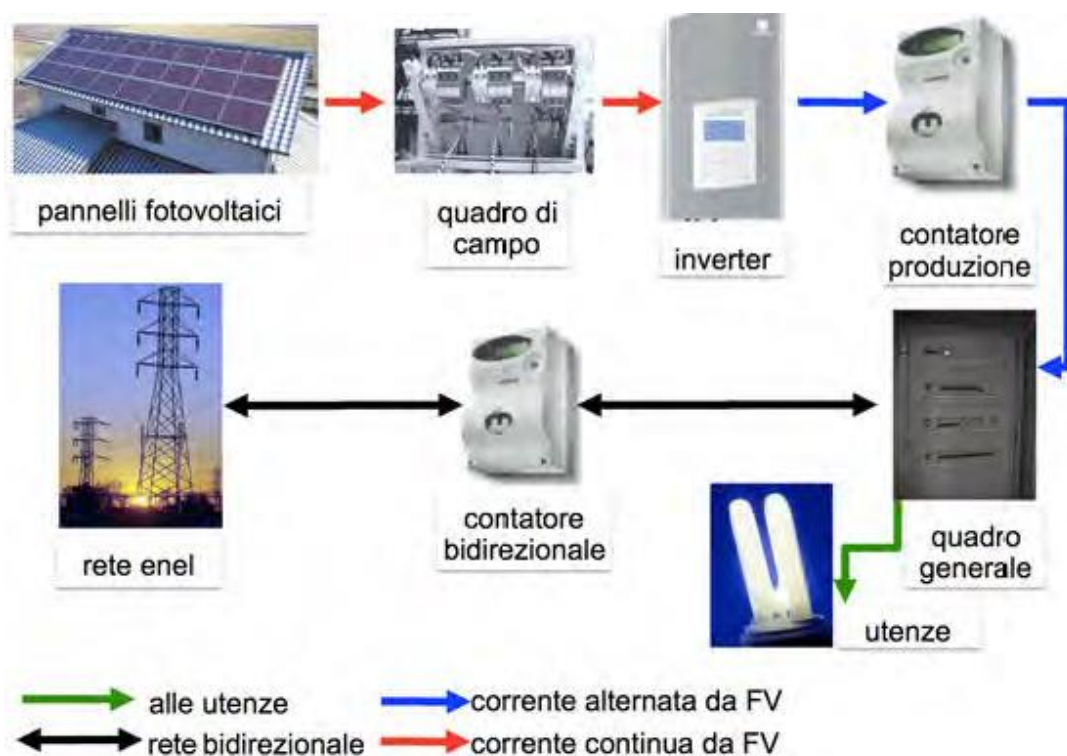


Figura 49 – Elementi che compongono un impianto FV.

I quadri di campo, o quadri di stringa, sono componenti non sempre presenti in un impianto. Quando vi sono, vengono interposti tra i pannelli e l'inverter ed hanno il compito di raccogliere i cavi provenienti dalle varie stringhe e collegare queste ultime in parallelo tra loro aumentando notevolmente l'intensità di corrente circolante. In linea di massima non vengono utilizzati sugli impianti di piccole potenze dove il collegamento in parallelo viene eseguito direttamente nell'inverter.

Visualizzazione dei componenti

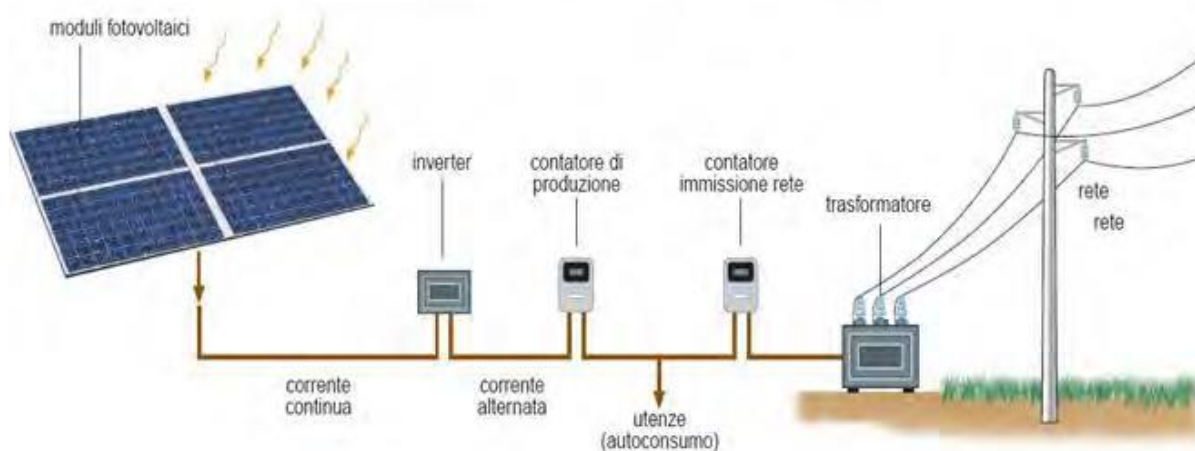


Figura 50 – Funzionamento di un impianto FV.

Impianto con presenza di quadro di campo

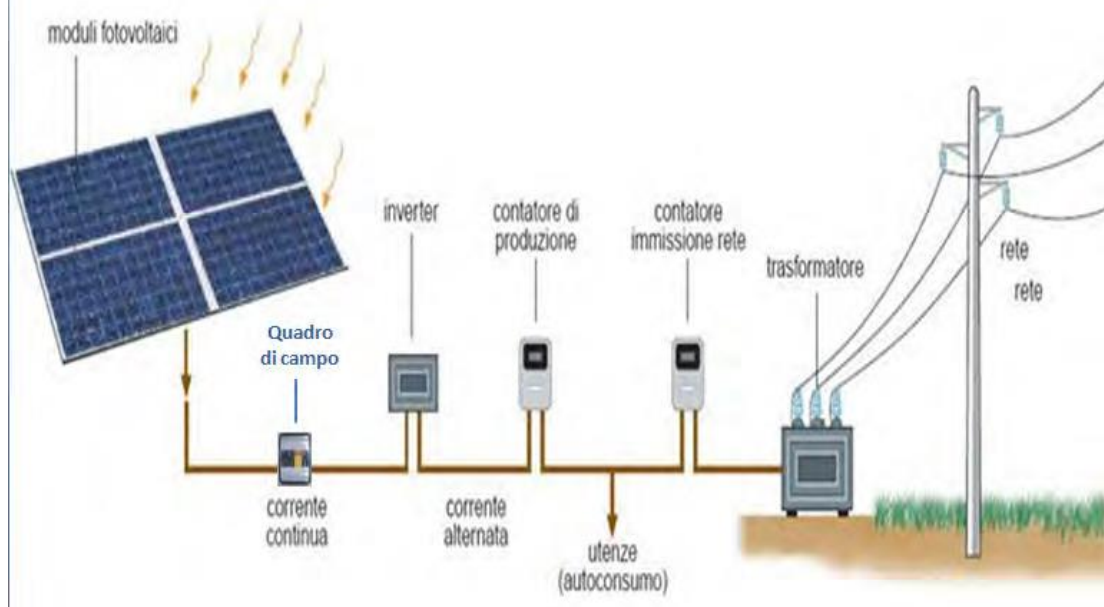


Figura 51 – Funzionamento di un impianto FV con quadro di campo.

Un sistema FV è in pratica un generatore di corrente continua C.C. (DC, Direct Current), in cui la tensione viene poi trasformata in corrente alternata C.A. (AC, Alternating Current) al fine di potersi interfacciare con la rete del gestore

dell'energia. Il gruppo di conversione statico della corrente continua, prodotta dai pannelli FV, in corrente alternata, da immettere in rete, detto “inverter”, attua il condizionamento ed il controllo della potenza trasferita.

La tensione continua DC in ingresso nell’inverter varia con il numero di pannelli e delle stringhe FV; mentre la tensione alternata AC in uscita dall’inverter, solitamente, per quanto riguarda gli impianti civili, assume valori pari a 230V - 50Hz, e per taluni impianti potrebbe assumere valori di tensione di 400V trifase - 50Hz.

3. Comportamento al fuoco dei pannelli fotovoltaici

A questo punto, è fondamentale comprendere il comportamento al fuoco dei pannelli FV tradizionali, per poter poi effettuare un confronto con quello degli elementi BIPV integrati nell'involucro degli edifici. Infatti, come già accennato, i convenzionali moduli fotovoltaici sono quelli che siamo abituati ad osservare applicati sulle coperture degli edifici, mentre, gli innovativi sistemi BIPV, vengono appunto integrati nell'involucro delle costruzioni andando a sostituire i più comuni materiali di rivestimento; in seguito, verrà trattata questa distinzione in maniera accurata.

I sistemi di generazione di energia fotovoltaica possono subire incendi spontanei, ma sono anche minacciati dagli incendi che si sviluppano nell'edificio in cui sono installati. Inoltre, considerato che attraverso tali sistemi scorre corrente, la presenza di calore è inevitabile, dal momento che i pannelli FV stessi sono elementi che in generale scaldano; di conseguenza, eventuali incendi sono molto difficili da estinguere.

È utile specificare che, generalmente, i pannelli FV non sono causa di incendi, se non in caso di guasto, e che normalmente non contribuiscono all'incendio con un significativo carico d'incendio.

Rispetto alle costruzioni tradizionali, però, il carico d'incendio degli edifici fotovoltaici è chiaramente più alto, e tali edifici sono più suscettibili al fuoco a causa dell'aggiunta di questo sistema di generazione energetica. Gli incendi generati in questi casi sono detti "elettrici", e risulta complesso interrompere efficacemente l'alimentazione di energia. Inoltre, l'acqua, che è il convenzionale mezzo antincendio, non può essere utilizzata per estinguere gli incendi di impianti fotovoltaici installati in edifici.

Inoltre, i materiali utilizzati per impermeabilizzare ed isolare termicamente i sistemi costruttivi possono spesso essere combustibili, come ad esempio gli isolanti a base di schiuma poliuretana, e quindi costituire dei pericoli “nascosti” relativi alla propagazione di incendi. Occorre comunque precisare che questi isolanti combustibili sono in genere additivati, al fine di limitare la propagazione degli incendi e di migliorarne la reazione al fuoco.

Per quanto riguarda la dinamica di propagazione nel caso specifico di sistema fotovoltaico applicato in copertura, le condizioni di delimitazione dell'incendio vengono mutate dalla presenza dell'impianto FV, riflettendo una significativa frazione di calore e rimandandola verso la superficie del tetto, impedendole di disperdersi nell'aria. Il calore riflesso si unisce quindi al flusso di calore proveniente dal fuoco, risultando in un flusso termico totale diretto verso la superficie della copertura. Qualora il flusso termico totale ecceda il flusso termico critico per il materiale sottostante, quest'ultimo prende fuoco. Dunque, la propagazione di un incendio può aver luogo in una membrana di copertura solo se il flusso termico critico di quest'ultima viene superato dalla somma del calore proveniente dall'origine dell'incendio con il calore riflesso dal pannello fotovoltaico. Il calore proveniente dalla fiamma e la deviazione della fiamma stessa definiscono l'area di massimo flusso del calore. Di conseguenza, il rischio correlato all'installazione di pannelli fotovoltaici non è tanto da imputare al carico di incendio aumentato e alla conseguente possibilità che i pannelli stessi vengano coinvolti aumentando il rischio, bensì alle mutate dinamiche di un eventuale incendio in copertura.



Figura 52 – Esempio di incendio di parte di impianto FV in copertura.

Sempre nel caso di impianto FV installato in copertura, che è senza dubbio la situazione più comune di applicazione di questo tipo di sistema, l'estensione delle fiamme e lo spessore in verticale, cioè la distanza in verticale tra la superficie posteriore del pannello FV e il profilo di estensione delle fiamme, si riducono all'aumentare dell'angolo di inclinazione del pannello e della distanza tra tetto e pannello, ma aumentano all'aumentare del tasso di rilascio di calore "HRR". Questi dati sono utili passando all'integrazione di elementi FV verticalmente sull'involucro di edifici.

3.1 Normativa di prevenzione incendi per gli impianti fotovoltaici

Per quanto riguarda il quadro normativo relativo agli impianti fotovoltaici, è fondamentale specificare che, oltre a non esserci un approccio armonizzato a livello europeo, non vengono riportate informazioni specifiche in merito ai sistemi BIPV integrati in edifici, bensì vengono trattati quasi esclusivamente gli impianti FV tradizionali.

Di seguito, si riporta una carrellata di normative nazionali a tale proposito, in modo tale da comprendere al meglio le direttive da utilizzare in fase di progettazione, esecuzione e funzionamento di un sistema FV.

3.1.1 Allegato alla nota prot. n. 1324 del 07 febbraio 2012

Rientrano nel campo di applicazione della seguente Guida per l'installazione degli impianti fotovoltaici, gli impianti con tensione in corrente continua (C.C.) non superiore a 1500 V.

In via generale, come già accennato, l'installazione di un impianto fotovoltaico (FV), in funzione delle caratteristiche elettriche/costruttive e/o delle relative modalità di posa in opera, può comportare un aggravio del preesistente livello di rischio di incendio. L'aggravio potrebbe concretizzarsi, per il fabbricato servito, in termini di:

- Interferenza con il sistema di ventilazione dei prodotti della combustione (ostruzione parziale/totale di traslucidi, impedimenti apertura evacuatori);
- Ostacolo alle operazioni di raffreddamento/estinzione di tetti combustibili;
- Rischio di propagazione delle fiamme all'esterno o verso l'interno del fabbricato (presenza di condutture sulla copertura di un fabbricato suddiviso in più compartimenti e modifica della velocità di propagazione di un incendio in un fabbricato mono compartimento).

Inoltre, risulta necessario valutare l'eventuale pericolo di elettrocuzione cui può essere esposto l'operatore VV.F. per la presenza di elementi circuitali in tensione. Si evidenzia che ai sensi del D.Lgs. 81/2008 dovrà essere garantita l'accessibilità all'impianto per effettuare le relative operazioni di manutenzione e controllo.

Ai fini della prevenzione incendi, gli impianti FV dovranno essere progettati, realizzati e mantenuti a regola d'arte.

L'installazione dovrà essere eseguita in modo da evitare la propagazione di un incendio dal generatore fotovoltaico al fabbricato nel quale è incorporato. Tale condizione si ritiene rispettata qualora l'impianto fotovoltaico, incorporato in un'opera di costruzione, venga installato su strutture ed elementi di copertura e/o di facciata incombustibili (Classe 0 secondo il DM 26/06/1984 oppure Classe A1 secondo il DM 10/03/2005). Risulta, altresì, equivalente l'interposizione tra i moduli fotovoltaici e il piano di appoggio, di uno strato di materiale di resistenza al fuoco almeno EI 30 ed incombustibile (Classe 0 secondo il DM 26/06/1984 oppure Classe A1 secondo il DM 10/03/2005).

In alternativa, potrà essere effettuata una specifica valutazione del rischio di propagazione dell'incendio, tenendo conto della classe di resistenza agli incendi esterni dei tetti e delle coperture di tetti (secondo UNI EN 13501-5:2009 Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 5: Classificazione in base ai risultati delle prove di esposizione dei tetti a un fuoco esterno secondo UNI ENV 1187:2007) e della classe di reazione al fuoco del modulo fotovoltaico attestata secondo le procedure di cui all'art. 2 del DM 10 marzo 2005 recante "Classi di reazione al fuoco per i prodotti da costruzione" da impiegarsi nelle opere per le quali è prescritto il requisito della sicurezza in caso d'incendio.

L'ubicazione dei moduli e delle condutture elettriche dovrà inoltre sempre consentire il corretto funzionamento e la manutenzione di eventuali evacuatori di fumo e di calore (EFC) presenti, nonché tener conto, in base all'analisi del rischio incendio, dell'esistenza di possibili vie di veicolazione di incendi (lucernari, camini, ecc.). In ogni caso i moduli, le condutture, gli inverter, i quadri, ed altri eventuali apparati non dovranno essere installati nel raggio di 1 m dagli EFC.

Inoltre, in presenza di elementi verticali di compartimentazione antincendio, posti all'interno dell'attività sottostante al piano di appoggio dell'impianto fotovoltaico, lo stesso dovrà distare almeno 1 m dalla proiezione di tali elementi.

L'impianto FV dovrà, inoltre, avere le seguenti caratteristiche:

- essere provvisto di un dispositivo di comando di emergenza, ubicato in posizione segnalata ed accessibile che determini il sezionamento dell'impianto elettrico, all'interno del compartimento/fabbricato nei confronti delle sorgenti di alimentazione, ivi compreso l'impianto fotovoltaico;
- in caso di presenza di gas, vapori, nebbie infiammabili o polveri combustibili, al fine di evitare i pericoli determinati dall'innescò elettrico, è necessario installare la parte di impianto in corrente continua, compreso l'inverter, all'esterno delle zone classificate ai sensi del D.Lgs. 81/2008 - allegato XLIX;
- nei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di materiale esplosivo, il generatore fotovoltaico e tutti gli altri componenti in corrente continua costituenti potenziali fonti di innesco, dovranno essere installati alle distanze di sicurezza stabilite dalle norme tecniche applicabili;
- i componenti dell'impianto non dovranno essere installati in luoghi definiti "luoghi sicuri" ai sensi del DM 30/11/1983, né essere di intralcio alle vie di esodo;
- le strutture portanti, ai fini del soddisfacimento dei livelli di prestazione contro l'incendio di cui al DM 09/03/2007, dovranno essere verificate e documentate tenendo conto delle variate condizioni dei carichi strutturali sulla copertura, dovute alla presenza del generatore fotovoltaico, anche con riferimento al DM 14/01/2008 "Norme tecniche per le costruzioni".

Dovrà essere acquisita la dichiarazione di conformità di tutto l'impianto fotovoltaico e non delle singole parti, ai sensi del D.M. 37/2008.

Periodicamente e ad ogni trasformazione, ampliamento o modifica dell'impianto, dovranno essere eseguite e documentate le verifiche ai fini del rischio incendio dell'impianto fotovoltaico, con particolare attenzione ai sistemi di giunzione e di serraggio.

3.1.2 Nota prot. n. 6334 del 4 maggio 2012

Chiarimenti alla "Guida per l'installazione degli impianti fotovoltaici – Edizione2012"

Nel valutare l'eventuale aggravio del preesistente livello di rischio di incendio devono essere valutati i seguenti aspetti:

- Interferenza con il sistema di ventilazione dei prodotti della combustione (ostruzione parziale/totale di traslucidi, impedimenti apertura evacuatori);
- Modalità di propagazione dell'incendio in un fabbricato delle fiamme all'esterno o verso l'interno del fabbricato (presenza di condutture sulla copertura di un fabbricato suddiviso in più compartimenti – modifica della velocità di propagazione di un incendio in un fabbricato mono compartimento);
- Sicurezza degli operatori addetti alla manutenzione;
- Sicurezza degli addetti alle operazioni di soccorso.

Qualora dalla valutazione del rischio incendio emerga un aggravio delle preesistenti condizioni di sicurezza antincendio nei confronti della/e attività soggette, dovranno essere assolti i seguenti adempimenti riferiti al DPR 151/2011:

- Per le attività in categoria A (secondo l'Allegato I del DPR 1 agosto 2011, n.151) – presentazione di Scia a lavori ultimati;
- Per le attività in categoria B e C (secondo l'Allegato I del DPR 1 agosto 2011, n.151) – presentazione del progetto ai fini della valutazione e Scia a lavori ultimati.

Qualora invece dalla valutazione del rischio incendio non emerga un aggravio delle preesistenti condizioni di sicurezza antincendio nei confronti della/e attività soggette, dovrà essere aggiornata la pratica con la presentazione della Scia.

In caso di presentazione della Scia senza preventiva approvazione del progetto, la documentazione dovrà essere integrata con la valutazione del rischio.

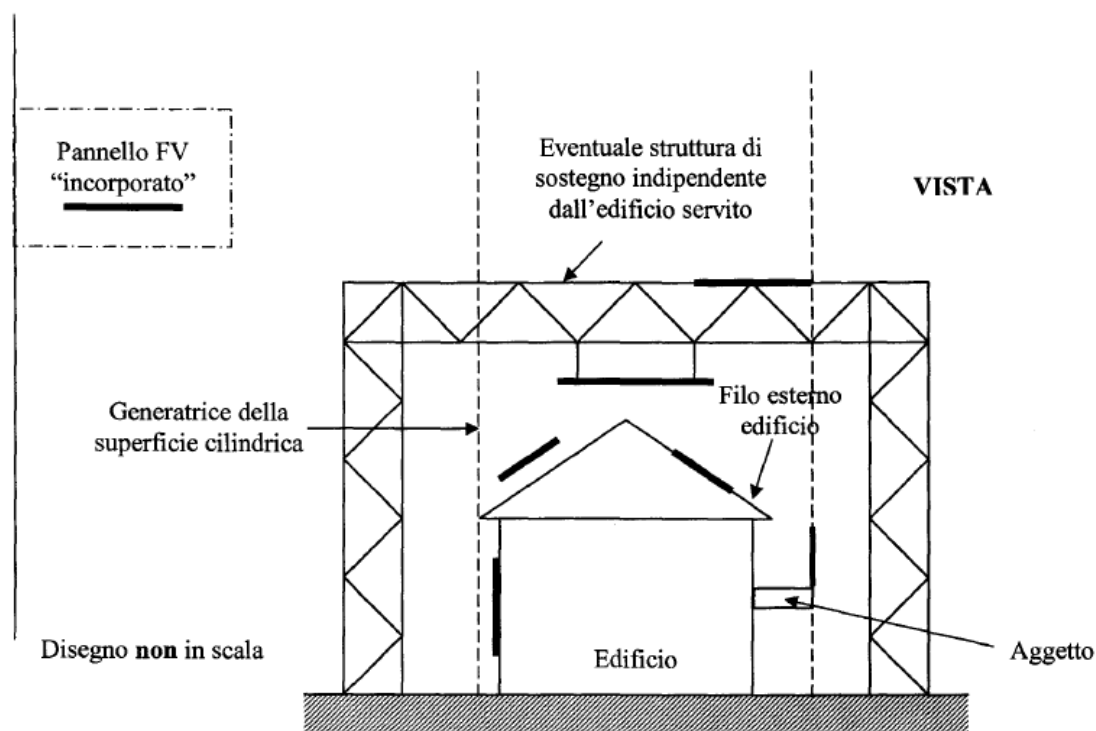
Per “impianto fotovoltaico incorporato in un'opera di costruzione” si intende un impianto i cui moduli ricadono, anche parzialmente, nel volume delimitato dalla superficie cilindrica verticale avente come generatrice la proiezione in pianta del fabbricato, inclusi aggetti e sporti di gronda.

Per quanto riguarda l'utilizzo di materiale di resistenza al fuoco almeno EI 30 ed incombustibile tra i moduli FV ed il piano di appoggio, tali strati EI 30 incombustibili possono essere provati con qualsiasi orientamento (in verticale ed in orizzontale) e con esposizione al fuoco sulla faccia prospiciente i moduli FV. È sufficiente che sia garantita l'incombustibilità anche di un solo “layer” continuo costituente il pacchetto dello strato. Uno strato può essere costituito da più “layer”, mentre, in caso di strato omogeneo, esso coincide con il “layer”.

Il dispositivo di emergenza deve essere in grado di sezionare il generatore fotovoltaico in maniera tale da evitare che l'impianto elettrico all'interno del compartimento/fabbricato possa rimanere in tensione ad opera dell'impianto

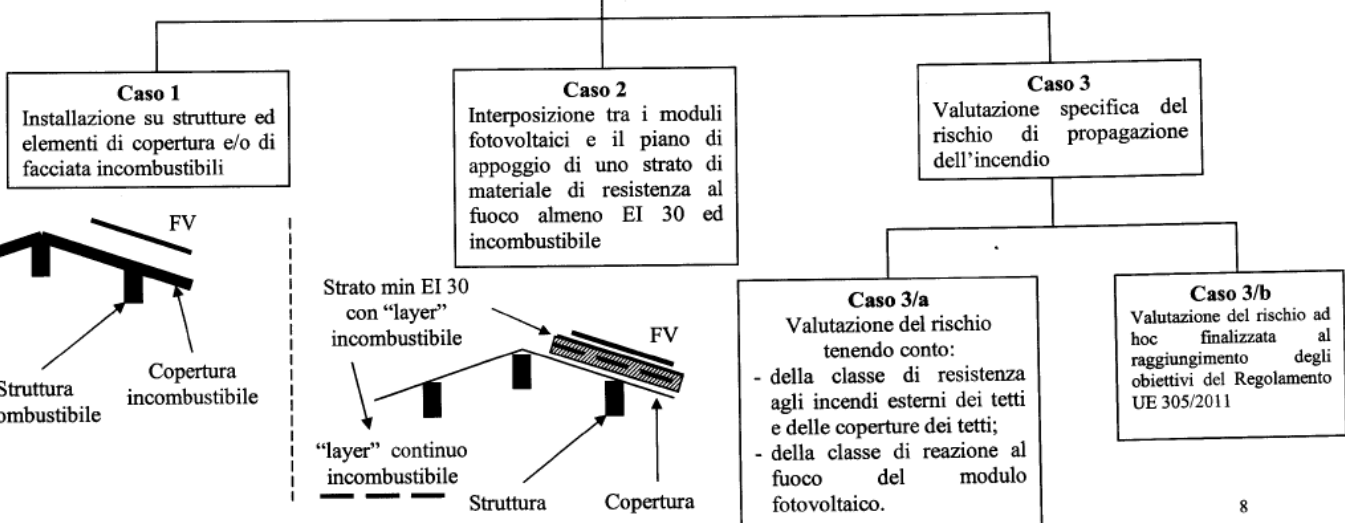
fotovoltaico stesso. Si rimarca che il dispositivo di comando di emergenza deve essere sempre ubicato in posizione segnalata ed accessibile agli operatori di soccorso.

ALLEGATO A



ALLEGATO B

L'installazione degli impianti FV dovrà essere eseguita in modo da evitare la propagazione di un incendio dal generatore fotovoltaico al fabbricato nel quale è incorporato (Requisiti tecnici)



ALLEGATO C



MOD. 4 VCF



Ministero dell'Interno

DIPARTIMENTO DEI VIGILI DEL FUOCO, DEL SOCCORSO PUBBLICO E DELLA DIFESA CIVILE
DIREZIONE CENTRALE PER LA PREVENZIONE E LA SICUREZZA TECNICA
AREA V - PROTEZIONE PASSIVA

REAZIONE AL FUOCO

Risoluzione n° 40 del 28/03/2012

Per la classificazione di pannelli fotovoltaici, indipendentemente dalla loro installazione e posa in opera, si applicano le procedure di prova previste dal D.M. 26/6/84, modificato con D.M. del 03/09/01 come di seguito riportate:

- UNI 9176 (Gennaio 1998) metodo D;
- UNI 8457 (Ottobre 1987) con campionatura di prova in posizione verticale senza supporto incombustibile;
- UNI 9174 (Ottobre 1987) con campionatura di prova in posizione parete senza supporto incombustibile;
- UNI 9177 (Ottobre 1987) relativamente alla classificazione.

Nel caso in cui il pannello presenti superfici opposte con materiale diverso differenti tra loro, va ricavata una serie di provette da ciascuno dei compositi esistenti nel materiale. A ciascuna serie si applicano le procedure di prova e di classificazione sopracitate attribuendo la classe peggiore tra quelle determinate.

Qualora il produttore dichiara che una delle due superfici sia realizzata con materiale incombustibile, la campionatura di prova dovrà essere ricavata solo dall'eventuale superficie realizzata con materiale combustibile.

L'incombustibilità di una delle due superfici del materiale dovrà essere attestata da apposita dichiarazione del produttore redatta, secondo il modello D 13 allegato, che costituirà parte integrante della scheda tecnica.

La scheda tecnica da redigere dovrà essere conforme al modello C .

Il certificato di prova, redatto secondo il modello CRF-8 allegato, dovrà essere emesso ai sensi dell'art.10 del D.M. 26/6/84 e successive modifiche, quale materiale per "INSTALLAZIONI TECNICHE" secondo l'Allegato A 2.1, indicando alla voce impiego "PANNELLO FOTOVOLTAICO".

Il Responsabile Tecnico
(Isp. Ant. Renato MANDILE)

Il Responsabile del Settore
(Dott. Ing. Giuseppe PADUANO)

Figura 53 – Allegati della 3.1.2 Nota prot. n. 6334 del 4 maggio 2012

3.1.3 *Nota Prot. EM 622/867 del 18/02/2011*

Procedure in caso di intervento in presenza di pannelli fotovoltaici e sicurezza degli operatori vigili del fuoco

Il rischio di caduta è quello più comune nel caso di impianto collocato su di un tetto, soprattutto in caso di buio e/o in presenza di fumo. Alcuni impianti sono integrati con il tetto, e ciò riduce fortemente il pericolo di inciampo ma non quello di scivolamento a causa della superficie di vetro di alcuni moduli cristallini. Gli operatori Vigili del Fuoco dovranno utilizzare i comuni d.p.i. previsti nel caso di lavori in altezza, soprattutto se non si può evitare di camminare sui pannelli.

A causa del sovraccarico dovuto alla presenza dei pannelli FV, il rischio di collasso della struttura sotto l'azione del fuoco è da prendere in maggiore considerazione.

Un altro pericolo da non trascurare è quello della caduta dei pannelli sia a causa del loro distacco dalle strutture di fissaggio, sia a causa del crollo della struttura stessa.

Riguardo il rischio di propagazione dell'incendio, è appena il caso di evidenziare che i componenti plastici dell'impianto saranno interessati dalla combustione.

In condizioni normali, i materiali usati per gli impianti FV sono considerati non pericolosi; essi possono diventare pericolosi in caso di esposizione all'incendio o in caso di esplosione. Infatti, in queste situazioni i pannelli FV possono rilasciare sostanze chimiche tra cui il boro, il tellurio di cadmio, l'arseniuro di gallio e il fosforo, alcuni di tali prodotti sono noti perché possono comportare problemi di natura tossicologica o causare danni all'ambiente. Il rischio di inalazione di agenti chimici pericolosi è minimo nel caso di piccoli impianti FV coinvolti in un incendio o in un'esplosione. Ben più elevato è il rischio di inalazione nel caso di impianti

FV di elevate dimensioni; tale rischio può essere minimizzato mediante gli usuali dispositivi di protezione delle vie respiratorie.

A tali rischi bisogna aggiungere quello di eventuali shock elettrici dovuti a contatto con impianti elettrici in tensione, dal momento che dal punto di vista della sicurezza occorre tenere conto che è impossibile porre fuori tensione il sistema fotovoltaico in presenza di luce solare. Quindi, finché c'è presenza di luce, l'impianto FV continua a generare energia elettrica. Di conseguenza, le squadre di soccorso devono considerare il sistema FV ed i suoi componenti costantemente in tensione e adottare le procedure operative standard previste in caso di interventi con presenza di sistemi connessi all'alimentazione elettrica. D'altra parte, in assenza di luce, i moduli FV non generano energia elettrica; pertanto, le operazioni effettuate durante la notte garantiscono un maggior livello di sicurezza.

Lo sgancio elettrico di emergenza, previsto dalle norme, consente di disalimentare l'impianto elettrico a valle dell'inverter. Invece, i conduttori ed i componenti elettrici posti tra i moduli FV ed il punto di sgancio di emergenza, in caso di esposizione alla luce solare, rimangono in tensione. Pertanto, i soccorritori devono fare molta attenzione a non rompere o danneggiare i conduttori o le apparecchiature elettriche, avendo cura di considerarli costantemente in tensione.

Infine, nel corso di un intervento di soccorso con presenza di impianti FV, si possono presentare due situazioni che possono risultare particolarmente difficoltose:

- a. Quando, a causa delle conseguenze del sinistro, l'integrità del pannello e/o dei conduttori non è più garantita;

- b. Quando risulta necessario lo smontaggio dei pannelli (azioni complementari allo spegnimento, ecc.).

In queste situazioni, dovendo procedere all'effettuazione di operazioni dirette sui pannelli, si valuterà se è possibile rinviarle alle ore notturne.

Sulla base delle valutazioni riportate nei punti precedenti, si è in grado di fornire le seguenti prime indicazioni:

- Identificare il tipo di impianto con cui si ha a che fare (termico o fotovoltaico), richiedendo informazioni, qualora necessario, al proprietario dell'impianto stesso;
- Informare immediatamente il ROS che si è in presenza di un impianto FV, in modo che possano essere adottate le procedure previste in funzione della valutazione del rischio;
- Evitare di rompere, rimuovere o camminare sui moduli FV e, se possibile, stare lontano dai moduli stessi, dai componenti e dai conduttori, perché in tensione. Qualora fosse necessario camminare sui pannelli, utilizzare tutti i dispositivi necessari in dotazione della squadra di soccorso al fine di limitare il rischio di caduta.

Durante le ore diurne:

- Sganciare il circuito al livello dell'inverter. Ciò consente solo di eliminare il rischio di elettrocuzione a valle dell'inverter stesso. Si raccomanda, inoltre, di provvedere allo sgancio dell'alimentazione elettrica generale dell'intero edificio, ricordando che ciò non interrompe l'alimentazione elettrica dell'impianto FV;
- Si consiglia di evitare, se possibile, ogni intervento diretto sui moduli in tensione. Se tale intervento risulta necessario e, soprattutto, se i pannelli

risultano accessibili, potrebbe essere necessario coprire tutti i moduli FV con materiali opachi (non trasparenti alla luce) in modo da eliminare il rischio di generazione dell'energia elettrica;

- Se, nel corso dell'intervento di soccorso, si rende necessario rompere un pannello o smontarlo, si deve, con molta accuratezza:
 - Disconnettere il modulo FV;
 - Smontare i pannelli integrati nel tetto e tagliare le strutture di fissaggio nel caso si tratti di pannelli collocati su strutture;
 - Portare i pannelli a terra e conservarli con la faccia sul terreno;
 - Coprire i pannelli collocati a terra per evitare che l'acqua raggiunga le scatole elettriche;
- In caso di fuga di gas o in presenza di atmosfera infiammabile bisogna non trascurare la possibilità di formazione di archi elettrici in prossimità di elementi in tensione degli impianti FV;
- In caso di incendio generalizzato che coinvolge anche l'impianto FV e che non permette di accedere ai pannelli, è necessario ricordare la necessità di adottare tutte le precauzioni previste dalle procedure operative standard in caso di incendio coinvolgente impianti elettrici in tensione.

3.1.4 Nota DCPREV prt. N. 11152 del 9/8/2011

Installazione di impianti fotovoltaici

Ai fini della prevenzione incendi, gli impianti fotovoltaici:

- Non devono costituire causa primaria d'incendio o di esplosione per il fabbricato servito;
- Non devono costituire causa di propagazione degli incendi per il fabbricato servito;

- Non devono interferire con i sistemi di evacuazione dei prodotti della combustione;
- Non devono costituire pericolo per i soccorritori durante le operazioni di spegnimento.

Pertanto, nell'ubicazione dei componenti del generatore fotovoltaico, come pannelli FV, condutture e quadri elettrici di giunzione del generatore FV, su pareti di edifici soggetti al controllo dei vigili del fuoco, si deve tener conto della possibile propagazione di un incendio originatosi all'interno dell'edificio, attraverso porte, finestre ed elementi di facciata costituiti dallo stesso generatore fotovoltaico, come ad esempio tamponamenti in vetro con sovrastante pannello fotovoltaico in silicio amorfo.

3.2 Materiali

Anche relativamente ai materiali che costituiscono i moduli FV tradizionali, è importante far riferimento ad essi per poi poter effettuare facilmente un confronto fra questi e quelli che invece fanno parte dei layers di elementi BIPV.

In generale, sulla superficie posteriore di supporto dei pannelli FV, detta "backsheet", in genere realizzata mediante un materiale isolante con scarsa dilatazione termica, come il vetro temperato o un polimero come il Tedlar, vengono appoggiati un sottile strato di acetato di vinile (spesso indicato con la sigla EVA), la matrice di moduli preconnessi, un secondo strato di acetato e un materiale trasparente che funge da protezione meccanica anteriore per le celle fotovoltaiche, in genere in vetro temperato.

Il backsheet, che è la copertura di fondo del modulo, riveste un ruolo fondamentale per quanto concerne affidabilità, durabilità e sicurezza del modulo stesso: esso costituisce uno dei materiali più critici in quanto è l'unico isolamento

posteriore del modulo. Durante la sua vita, un modulo FV è esposto a vari stress ambientali ed elettrici, e questi effetti nocivi possono influenzare il suo rendimento elettrico e la sua durata. Essendo una delle parti più esterne del modulo, il backsheet ha il compito di garantire una buona resistenza contro gli agenti atmosferici, una buona aderenza alla scatola di giunzione, una protezione contro umidità, raggi UV, danni meccanici e chimici e diffusione del fuoco.

“Tedlar” è il nome commerciale di un film di polivinilfluoruro caratterizzato da proprietà chimiche, elettriche e di resistenza meccanica, alle quali si aggiungono buone caratteristiche di barriera ai raggi UV e di resistenza all'invecchiamento atmosferico. Dal momento che è resistente alla fiamma, viene usato come film protettivo anche nell'industria aeronautica.

A questo punto, si vuole analizzare l'infiammabilità di tre diversi tipi di backsheet in commercio, senza però fornirne una classificazione.

	BS1	BS2	BS3
Layers	PVDF	FEVE	PVF
	PET	PET	PET
	PVDF	-	PVF
Layers Thickness	25 µm	25 µm	25 µm
	250 µm	250 µm	275 µm
	25 µm	-	25 µm
Total Thickness	300 µm	275 µm	325 µm

Figura 54 – Caratteristiche di tre diversi tipi di backsheet in commercio.

I due backsheet composti da tre strati (BS1 E BS3) presentano una minore velocità di propagazione della fiamma se comparati con il backsheet costituito da due strati: il BS2 ha infatti cominciato a bruciare non appena la fiamma è stata applicata, mentre BS1 e BS3 hanno resistito alla prima applicazione, presentando solo segni di contrazione, ed hanno cominciato a bruciare solo dopo la seconda

applicazione. Si osserva come lo spessore del backsheet abbia quindi un impatto positivo sul tempo di resistenza al fuoco, e come porti ad un aumento del punto di infiammabilità: la resistenza maggiore è stata osservata nel BS3. Il BS1, pur essendo costituito anch'esso da tre strati, brucia in un tempo minore a causa dei materiali utilizzati, diversi da quelli del BS3.

Negli ultimi anni, molti produttori di backsheet hanno sviluppato nuovi materiali, tra i quali il più comune è il PET (Polietilene Tereftalato). La superficie interna di un backsheet consiste generalmente di uno strato di primer, al fine di garantire una buona adesione al materiale incapsulato; questo primer è quasi sempre costituito da EVA. La superficie esterna del backsheet ha il compito di garantire una buona resistenza agli agenti atmosferici, un buon legame con la scatola di giunzione, e una protezione efficace contro umidità, raggi UV e danni meccanici e chimici.

In generale, i backsheet più pesanti sono caratterizzati da una minor velocità di propagazione della fiamma.

	BS1	BS2	BS3	BS4
Layers	PET PET Primer	PET Aluminium PET Primer	Fluor coating PET EVA	Outside coating PET Inside coating
Layers thickness	50 µm 125 µm 100 µm	50 µm 9 µm 190 µm 100 µm	10 µm 125 µm 110 µm	7 µm 300 µm 7 µm
Total thickness	295 µm	370 µm	250 µm	315 µm
Weight	360 g/m ²	510 g/m ²	320 g/m ²	450 g/m ²
Interlayer	Adhesive	Adhesive	No adhesive; external layer are coatings	No adhesive; external layer are coatings

Figura 55 – Caratteristiche di quattro diversi tipi di backsheet.

La presenza di una lamina di metallo all'interno del BS2 rende il campione più resistente al danneggiamento da fiamma. Mentre, nonostante il BS3 sia più sottile del BS1, la sua area danneggiata è risultata essere inferiore, e questo

potrebbe essere dovuto all'assenza di materiale adesivo tra gli strati del BS3, dal momento che gli strati esterni non sono incollati, bensì costituiscono il rivestimento. Il BS4, più spesso e con assenza di adesivi, presenta un'area danneggiata più piccola rispetto al BS1 e il BS3, e anche nel BS4 gli strati adesivi sono rivestimenti. Concludendo, il backsheet BS4, essendo monostrato, rappresenta la migliore soluzione tra quelli testati, in quanto si è classificato come Classe 1 per quanto riguarda la reazione al fuoco. In Classe 1 risulta appartenere anche il BS2, ma occorre segnalare che l'introduzione nel backsheet di un foglio di alluminio potrebbe essere critica per il comportamento elettrico del materiale, in quanto l'alluminio conduce elettricità.

Passando poi all'Etilene Vinile Acetato – EVA, bisogna specificare che l'acetato di vinile o vinil acetato è l'estere vinilico dell'acido acetico che, a temperatura ambiente, è un liquido incolore, infiammabile, dall'odore dolciastro. Data la facilità con cui può polimerizzare, viene generalmente conservato per aggiunta di stabilizzanti. Il suo polimero, noto semplicemente come acetato, è un materiale perfettamente trasparente, utilizzato spesso in fogli sottili, da riprodurre tramite procedimento di pressofusione che lo rende un collante inerte. Dopo tale procedimento, che trasforma l'EVA in mero collante inerte, le terminazioni elettriche dei nastri vengono chiuse in una morsettiera stagna generalmente fissata alla superficie di sostegno posteriore, e il "sandwich" ottenuto viene fissato ad una cornice in alluminio, che sarà utile al fissaggio del pannello.

In conclusione, quindi, il backsheet, composto prevalentemente da poliestere, ha buone caratteristiche di reazione al fuoco, mentre l'EVA (Etilen vinil acetato) contenuto, e avente la funzione di mantenere assemblati backsheet e celle con il vetro temprato, risulta essere un materiale rapidamente combustibile e che

presenta sviluppo di combustibili in fase gassosa, una volta degradato termicamente. Per questo motivo, si stanno sviluppando nuovi incapsulanti EVA a base di materiali ibridi contenenti silicone e fosforo in modo da migliorare l'effetto ritardante in caso di incendio.

Per quanto riguarda la struttura chimica dei moduli FV, in commercio troviamo pannelli con modulo in silicio, termicamente stabile, e adesivo poliuretano, o pannelli con resina epoxidica, che invece si scioglie in condizioni di riscaldamento ad alte temperature.

Come già accennato, sono solitamente i materiali isolanti ed impermeabilizzanti a costituire un rischio in caso di incendio. In una copertura caratterizzata da una stratigrafia tipica dei magazzini (isolante in EPS e membrana in PVC), è stato effettuato un test per verificare se la presenza di un materiale di mitigazione, costituito da un isolante in poliisocianurato (PIR) di 40 mm, o in lana minerale con spessore di 30 mm, riesca a prevenire la propagazione verso il basso dell'incendio. Sebbene i diversi strati di mitigazione non abbiano un'influenza diretta sulla combustione della membrana posta sulla copertura, è stato osservato che essi reagiscono diversamente al calore proveniente dalla combustione della membrana stessa e dal dispositivo di innesco dell'incendio ("wood crib"). Per quanto riguarda lo strato di PIR, si è potuto rilevare che il calore proveniente dal cosiddetto "wood crib" compromette l'integrità del prodotto, dando luogo ad una penetrazione dello strato di mitigazione e ad un avvio di incendio dell'isolamento in EPS dello strato sottostante. Nei test in cui lo strato di mitigazione viene realizzato in lana minerale, invece, tale strato non ha presentato danni fisici e l'isolamento in EPS non è stato coinvolto nell'incendio. Nonostante ciò, l'isolante in EPS si è sciolto a causa della conduzione di calore attraverso lo strato di lana minerale. La totalità di questi

esperimenti ha dimostrato che l'area di diffusione dell'incendio è limitata all'area in cui sono presenti i pannelli fotovoltaici, e si è inoltre notato che il fuoco propaga al di sotto di tutti i pannelli FV indipendentemente dalle condizioni di ventosità (da assenza di vento a vento moderato). La causa principale di diffusione dell'incendio sulla membrana consiste quindi nelle variazioni di scenario della dinamica stessa dell'incendio e non dal carico d'incendio rappresentato dai pannelli, né dal vento.

3.3 Comportamento elettrico

Gli impianti di generazione dell'energia elettrica che utilizzano pannelli fotovoltaici rientrano nell'insieme più generale degli impianti elettrici e quindi, come tutti gli impianti di questo tipo, presentano un certo rischio di incendio, essenzialmente dovuto a sovraccarico e corto circuito. Tuttavia, se già un impianto elettrico presenta rischi connessi alla distribuzione, con l'aggiunta di un impianto fotovoltaico subentrano anche rischi legati alla produzione, in quanto l'impianto produce energia ad una determinata tensione; inoltre, scorrendo corrente, i pannelli FV sono elementi che generano inevitabilmente calore e di conseguenza si scaldano.

In generale, paradossalmente, gli impianti fotovoltaici hanno dei vantaggi riguardo il loro comportamento in caso di incendio rispetto agli altri impianti elettrici, dal momento che si trovano all'aperto e quindi presentano una posa areata, a differenza ad esempio di conduttori sistemati in controsoffitti porta cavi.

Le potenziali cause di incendio nei sistemi fotovoltaici possono essere divise in due categorie: da un lato, quelle legate al generatore fotovoltaico (un insieme di stringhe collegate in parallelo, contenenti moduli collegati in serie) e, dall'altro,

quelle legate al sistema elettrico, che comprende input in corrente continua DC, inverter e output in corrente alternata AC.

I generatori fotovoltaici presentano dunque i seguenti rischi:

- hotspot nei moduli FV;
- surriscaldamento o arco elettrico nei moduli fotovoltaici;
- surriscaldamento o arco elettrico nei quadri DC;
- surriscaldamento o arco elettrico nel cablaggio di AC.

Molti sistemi fotovoltaici presentano un voltaggio sufficientemente alto (dai 300 ai 1000 Volt di DC), tale da renderli possibili cause dello scoppio di un incendio.

In alcuni casi, i moduli fotovoltaici possono quindi costituire l'origine stessa dell'incendio: l'innescò, in questo caso, ha luogo a causa di guasti nel comportamento elettrico degli impianti fotovoltaici. Infatti, poiché questi ultimi costituiscono una sottofamiglia degli impianti elettrici, in generale presentano, come già detto, le due maggiori cause di innesco di natura elettrica, vale a dire sovraccarico e cortocircuito. In particolare, il fenomeno dell'arco voltaico ("Series Arcing", "Parallel Arcing", "Grounding Arcing") è una delle cause principali di innesco di incendi, e un'altra è legata ad un meccanismo noto come "hot spot".

Di conseguenza, come già evidenziato, l'installazione di un impianto fotovoltaico presso un'attività soggetta ai controlli dei VV.F., in funzione delle caratteristiche elettriche/costruttive e/o delle modalità di posa in opera, può quindi comportare un aggravio del preesistente livello di rischio di incendio attribuito all'attività stessa.

Inoltre, risulta necessario valutare l'eventuale pericolo di elettrocuzione cui può essere esposto l'operatore dei VV.F. per la presenza di elementi circuitali in tensione.

A tale proposito, risulta fondamentale considerare il fatto che, nonostante sia possibile sganciare l'alimentazione elettrica generale dell'edificio, l'alimentazione elettrica dell'impianto FV non si può interrompere mai del tutto. I test confermano che è la corrente continua a fluire nel cavo DC, e che il sistema fotovoltaico continua a lavorare durante l'incendio. Ad esempio, il fenomeno dell'arco voltaico può verificarsi durante la diffusione delle fiamme e può continuare esso stesso a innescare nuovi incendi. Questo è il motivo per cui i Vigili del Fuoco devono fare attenzione nell'uso di dispositivi di estinzione delle fiamme: una corrente pericolosa può attraversare il getto d'acqua che entra in contatto con la parte attiva del modulo danneggiato dal fuoco. In fase di progettazione di un sistema fotovoltaico sarebbe dunque da prevedere l'inserimento di interruttori o sezionatori del circuito di corrente continua DC.

È importante tenere presente che il pannello FV produce tensione DC non appena viene irraggiato dalla luce solare; pertanto, occorre sempre sezionare l'impianto aprendo tutti gli organi di sezionamento/protezione presenti e relativi al sistema FV.

In sostanza, un pannello FV funziona come un elemento di una batteria: ai suoi capi, se sottoposto ad irraggiamento, è presente una tensione continua, che si può ridurre a valori prossimi allo zero unicamente mettendo fuori uso il pannello attraverso azioni che portino ad oscurare le celle FV.

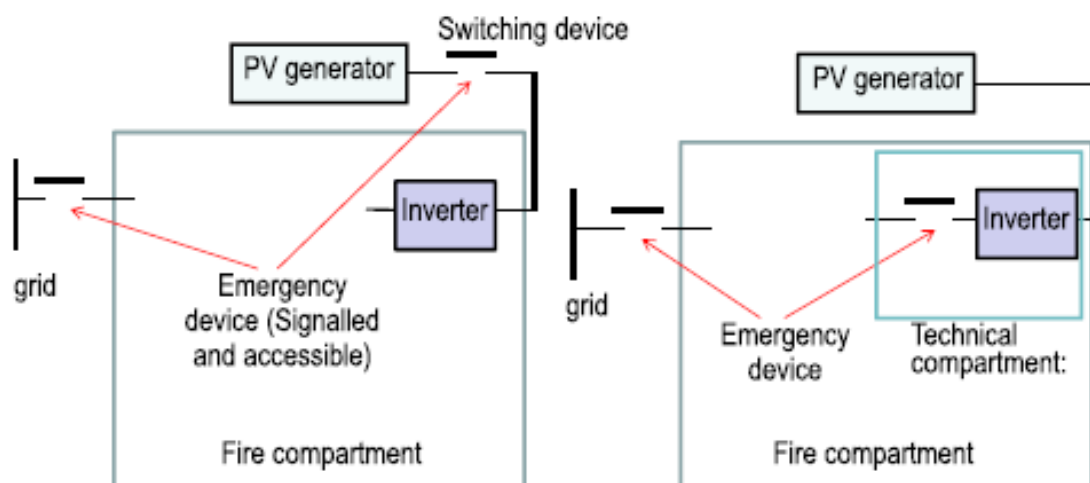


Figura 56 – Funzionamento dell'impianto FV con dispositivi di emergenza.

Dal momento che un impianto fotovoltaico, durante e anche dopo un incendio che lo ha danneggiato, è in grado di poter essere pericoloso per via dei moduli ancora funzionanti, per ragioni funzionali e di sicurezza, i circuiti elettrici sono dotati di dispositivi di manovra ed interruzione, per:

- sezionamento – per poter effettuare lavori elettrici;
- interruzione – per poter eseguire lavori non elettrici su apparecchiature;
- interruzione di emergenza – di fronte al rischio di pericolo imminente;
- comando funzionale – per aprire o chiudere i circuiti per motivi funzionali.

Durante un incendio, non è quindi possibile spegnere l'intero sistema di energia fotovoltaica in modo da garantire che tutti i componenti vengano de-energizzati. Infatti, questi sistemi continuano a funzionare fin quando c'è luce. Perciò anche i getti d'acqua sono da utilizzare il meno possibile e con attenzione, a causa della conducibilità, e utilizzando appropriate distanze di sicurezza.

Al giorno d'oggi, i sistemi fotovoltaici sono classificati fino a 1000 V, e le linee guida italiane per la sicurezza elettrica stabiliscono 120 V DC come valore massimo raggiungibile in sicurezza. Dal momento che i moduli o i componenti

danneggiati potrebbero presentare conduttori ad alto voltaggio (alta tensione), durante le operazioni di salvataggio da parte dei VV.F., il sistema fotovoltaico deve essere considerato energizzato, vale a dire in tensione, se esposto a luce solare o artificiale.

Durante le operazioni di salvataggio, quando bisogna smontare i conduttori di corrente continua dal circuito, la corrente può continuare a scorrere in arco nell'aria fra i conduttori. Questo si può propagare per oltre diversi millimetri, a seconda del livello di voltaggio e delle condizioni ambientali.

Sul lato di corrente continua del campo fotovoltaico, se si installasse un dispositivo che vada a spegnere o disconnettere ogni singolo modulo FV, il rischio di uno shock elettrico di corrente continua per il personale di salvataggio potrebbe essere scongiurato. Inoltre, sarebbe opportuno prevedere che il campo fotovoltaico disponga di un dispositivo di spegnimento di emergenza in modo tale da interrompere il generatore FV nel punto in cui il circuito elettrico entra nell'edificio o in un compartimento antincendio. Tale dispositivo deve essere capace di disconnettere il generatore FV in modo tale da evitare che il campo elettrico possa rimanere elettricamente in tensione all'interno dell'edificio in caso di incendio.

A tal proposito, è importante evidenziare che l'interruttore differenziale funziona bene nella parte alternata AC dell'impianto, perché la corrente alternata oscilla e, quando si ha corrente nulla, è possibile staccare ed aprire il circuito facilmente; in corrente continua, invece, questo non avviene, bensì, quando si va ad aprire si verifica l'arco elettrico, dal momento che la corrente tende a continuare a percorrere il circuito in cui è inserita. Quindi, il fatto di avere un interruttore differenziale in corrente alternata è possibile perché, nel momento in cui si stacca l'alimentazione dalla rete elettrica, il SPI "sistema di

protezione di interfaccia” non legge più tensione dalla rete elettrica e ferma l’inverter, e in questo modo si ha lo spegnimento dell’impianto, continuando però ad avere tensione. Invece, non è possibile interrompere i contatti diretti in corrente continua mediante il differenziale: in corrente continua DC si possono al massimo prevedere dei magnetotermici che vanno a leggere i valori di calore o di corrente di picco, che però non riescono ad intervenire in tempi brevi. Di conseguenza, sono stati progettati dei sistemi di rapido spegnimento (RSS), proprio perché i sistemi attualmente esistenti non garantiscono, in corrente continua, un rapido ed efficace sistema di frazionamento.

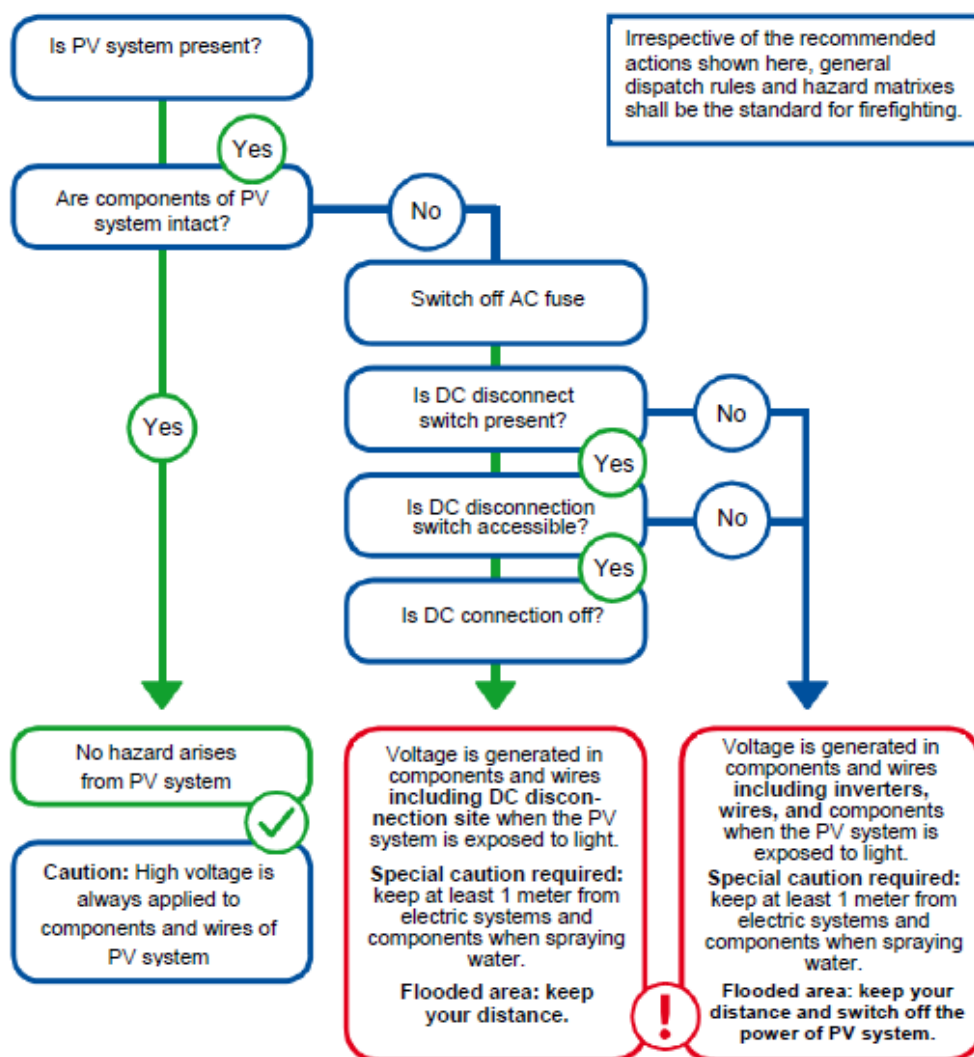


Figura 57 - Indicazioni riguardo le operazioni dei Vigili del Fuoco secondo le linee guida dell’Associazione VV.F. Tedesca.

Si sottolinea inoltre come la temperatura raggiunta durante l'incendio comprometta la stabilità della struttura in alluminio e delle strutture di fissaggio dei moduli. Le alte temperature potrebbero anche far scoppiare il vetro temperato utilizzato nei moduli, non garantendo la stabilità meccanica del modulo durante l'incendio.

Risulta quindi necessario eseguire sempre una valutazione dell'aggravio di rischio di incendio, dovuto ai pannelli, nei confronti dell'attività. Per effettuare l'analisi del rischio dovuto ai pannelli occorre valutare:

1. Quanto sia il combustibile presente nei pannelli, mediante la determinazione del carico d'incendio;
2. Le caratteristiche di propagazione e la velocità di combustione, mediante valutazione di prove sperimentali.

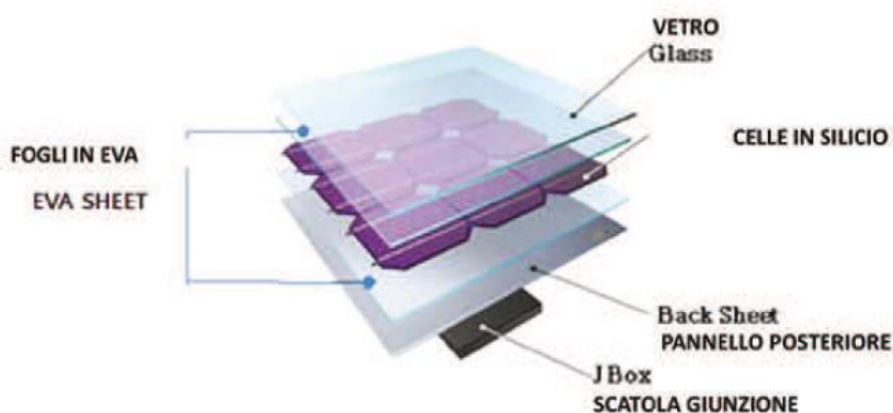


Figura 58 – Composizione di un modulo FV.

Sicuramente, un impianto installato a regola d'arte elimina le numerose problematiche relative alla cattiva installazione di un qualsiasi impianto elettrico; la formazione dell'arco elettrico oppure il raggiungimento di temperature elevatissime della pellicola retrostante il pannello (Tedlar), potrebbero però essere comunque cause d'innesco.

3.3.1 Arco voltaico

Uno dei problemi più frequenti relativi agli incendi di edifici con sistema FV è connesso ai cablaggi. Viste le tensioni non indifferenti in gioco, un primo rischio è quello dell'arco elettrico, o arco voltaico, spesso generato da connessioni a vite allentate, e che può innescare il materiale sottostante che lentamente si autoalimenta fino a sviluppare l'incendio, anche in ore notturne.

Come risultato di un arco voltaico all'interno di un modulo, si ha che il vetro frontale viene ombreggiato e il backsheet si infiamma.

Vi sono diverse tipologie di arco voltaico:

- Arco in parallelo tra le due fasi;
- Arco in serie tra cella e cella, dovuto a possibili problemi di ossidazione, o difettosità delle saldature di unione per collegare tra loro le celle. In questo caso, il vetro in superficie rimane intatto, ma il problema si verifica all'interno, con la scarica che può intaccare la pellicola di EVA ed il Tedlar sottostante, ed innescare l'incendio del pannello. È possibile che si sviluppi un arco elettrico all'interno del pannello a causa delle difettosità delle saldature tra le varie celle oppure per ossidazione creatasi a seguito di perdita di ermeticità del pannello;
- Arco elettrico nella scatola di giunzione;
- Arco tra una delle due fasi e la terra.

Una delle cause di tale fenomeno è l'ossidazione interna detta a "bava di lumaca".

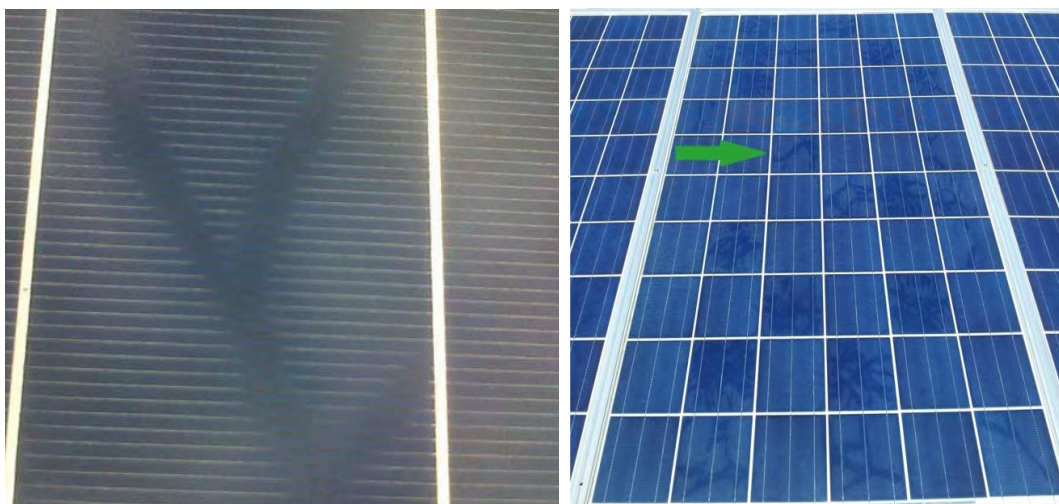


Figura 59 – Ossidazione interna a bava di lumaca.

Inoltre, le connessioni lente del telaio e la particolare collocazione dei pannelli situati al termine della falda, possono creare infiltrazioni di acqua che nel tempo possono generare, durante il funzionamento, significative correnti di cortocircuito in grado di innescare i pannelli.

Telaio con perdita di integrità situato nel sottogronda a fine falda dove convogliano tutte le acque piovane che penetrando all'interno delle celle creano fenomeni di cortocircuito.



Figura 60 – Cortocircuito generato da perdita di integrità del telaio a causa dell'acqua piovana.

Un'altra causa dell'arco voltaico è costituita dall'inverter che, come tutti gli apparecchi di questo tipo, può surriscaldarsi. Di conseguenza, se il suo sistema di raffreddamento non è stato correttamente dimensionato, esso può costituire

fonte di innesco. Dal momento che l'inverter è normalmente ospitato in un apposito locale, l'innesco può facilmente propagarsi alle altre apparecchiature contenute nel medesimo locale. Una volta estinto l'incendio, è necessario sezionare i cavi che dalla canalina vanno verso l'inverter, evitando così che il funzionamento del generatore FV continui ad alimentare il cortocircuito all'interno degli inverter stessi.

Infine, un altro dei punti deboli dell'impianto FV è rappresentato dai cavi che, con la perdita di isolamento, possono provocare archi elettrici lungo le tratte tra i pannelli, i quadri stringa o gli inverter. In particolare, i cavi devono essere resistenti ai raggi UV ed alle alte temperature, ed essere di sezione adeguata e correttamente collegati. In particolari condizioni e dopo periodi prolungati di utilizzo, la guaina isolante dei cavi solari può perdere le sue proprietà isolanti. A causa di ciò, essa può divenire sede di pericolose scariche di perforazione, dovute alla degradazione dell'isolante; tali scariche, oltre a comportare un disservizio in termini di efficienza energetica del generatore fotovoltaico, potrebbero innescare pericolosi archi in corrente continua.

3.3.2 Arco elettrico nei generatori fotovoltaici

I generatori FV lavorano con considerevoli voltaggi e correnti continue DC in costante variazione. Il fenomeno di arco in corrente continua DC è ovviamente più pericoloso che quello in AC, dal momento che non vi sono abbassamenti a zero poiché la corrente cambia direzione.

È molto importante rilevare tali fenomeni in modo tale da eliminare il rischio di incendio. Quando viene rilevato un arco voltaico, il dispositivo di protezione deve esser capace di disconnettere il circuito difettoso e tutti i componenti del sistema coinvolti. Difatti, quando si ha un arco, in serie o in parallelo, in un generatore fotovoltaico, accade che vengono distorti i segnali di corrente e

voltaggio e per questo si hanno cambiamenti delle caratteristiche di frequenza di tali segnali. Il principio di funzionamento dei rilevatori di archi voltaici è basato su un'analisi dei cambiamenti prodotti all'interno dello spettro di frequenza dei segnali rilevati. Un'ulteriore difficoltà si ha nel capire se si è trattato di un arco in serie o in parallelo, dal momento che il segnale è solitamente lo stesso in entrambi i casi.

3.3.3 Hot Spot

Un secondo rischio di incendio dei pannelli FV è dovuto al cosiddetto fenomeno di "hot spot", ovvero ad un riscaldamento localizzato. Nei moduli, è impossibile che tutte le celle fotovoltaiche siano perfettamente identiche e può anche accadere che una parte del campo FV sia in ombra, o anche semplicemente più sporca per presenza di foglie o polvere: perciò, due stringhe di moduli collegate in parallelo non avranno mai perfettamente la stessa tensione. Di conseguenza, si potrebbe verificare una corrente interna inversa che potrebbe provocare danni o surriscaldamenti localizzati. Per evitare ciò, nei circuiti elettrici si inseriscono appositi diodi: la mancanza di diodi, ovvero il posizionamento di diodi in numero o di caratteristiche insufficienti, ovvero il loro posizionamento scorretto, ovvero la scelta di materiale non idoneo, ecc. sono tutti fattori che possono provocare un hot spot, con conseguente rischio di innesco.

In un modulo FV, questo fenomeno avviene quindi nel momento in cui altre celle dissipano potenza su quella parzialmente ombreggiata, che potrebbe assumere il ruolo di carico; ciò potrebbe originare un surriscaldamento localizzato sul backsheet con relativo rischio di danneggiamento irreversibile delle celle in ombra e di innesco di incendio. Il fenomeno di hot spot in un modulo FV produce quindi surriscaldamenti localizzati sul backsheet, che possono far scoppiare un incendio.

Il flusso di correnti inverse all'interno di un modulo, causate da ombreggiamenti o disallineamenti delle celle FV, è dunque responsabile di un meccanismo di accensione del fuoco detto "mismatch". Le celle oscurate subiscono un cambio di "mansione", e da generatori diventano utilizzatori, con successivo ed eccessivo surriscaldamento. Dal momento che le celle sono collegate in serie, l'ombreggiamento di una singola cella diminuirebbe il flusso della corrente in tutte le altre celle. Nel caso non sia presente ombreggiamento, la corrente totale che fluisce nella serie è circa pari alla corrente delle singole celle, e la tensione è la somma delle tensioni delle singole celle. Nel caso, invece, di ombreggiamento di una o più celle, la cella ombreggiata diventa un utilizzatore e consuma energia, dissipando la potenza generata dalle altre celle non ombreggiate.

Il tutto potrebbe favorire squilibri di tensione tra le singole stringhe, a seguito di sbilanciamenti nell'erogazione della potenza da parte delle stesse, il che può dare luogo ad un flusso di corrente inversa proveniente dalle stringhe non ombreggiate poste in parallelo, diretto verso quelle in ombra: il cosiddetto "mismatch". Una cattiva connessione tra moduli, stringhe e convertitore DC/AC, potrebbe generare una quantità di calore sufficiente ad avviare un incendio.

Quindi, il fenomeno dell'hot spot consiste nel surriscaldamento, con relativo rischio di danneggiamento irreversibile, delle celle in ombra.

I costruttori dei moduli FV inseriscono diodi di by-pass nella scatola di collegamento, allo scopo di "cortocircuitare" ogni singolo gruppo di celle in caso di ombreggiamento; in pratica il diodo si connette in parallelo ai gruppi di celle in serie che costituiscono un modulo. L'andamento del fronte di fiamma avviene in modo ellittico con effetto domino del pannello che, incendiatosi, si propaga ai pannelli confinanti.

Vengono fornite indicazioni quali la progettazione di installazioni fotovoltaiche in grado di minimizzare l'effetto camino, e l'inserimento di due dispositivi di fondamentale importanza: il diodo di by-pass e il diodo di blocco.

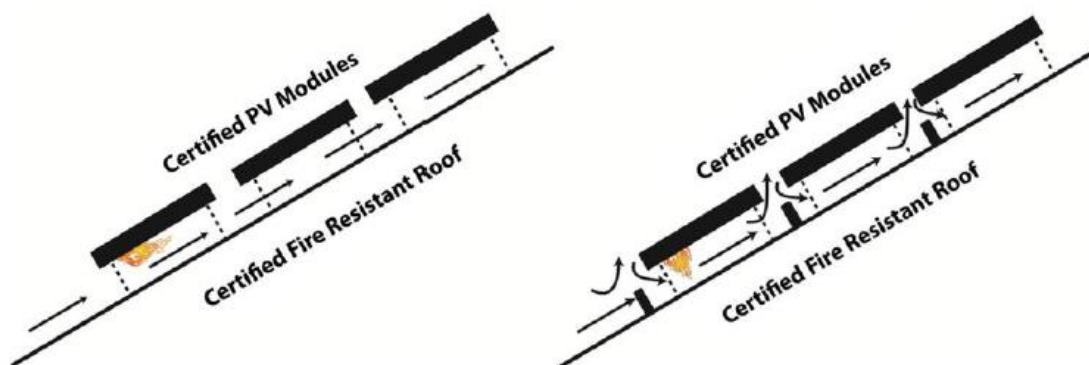


Figura 61 – Inserimento di diodi per minimizzare l'effetto camino.

I diodi di by-pass evitano l'eventuale dissipazione della potenza di altre celle su quella parzialmente ombreggiata, che potrebbe essere "vista" come carico a causa del fenomeno dell'hot spot. I diodi sono connessi in antiparallelo ad un adeguato numero di celle fotovoltaiche nella direzione della corrente diretta. L'assenza del diodo limiterebbe la corrente di tutta la stringa a quella erogata dalla cella oscurata, limitando così la potenza dell'intera stringa.

I diodi di blocco sono invece posti in serie a ciascuna stringa per impedire che gli squilibri di tensione tra le singole stringhe, nel caso di sbilanciamento nell'erogazione di potenza da parte delle stesse, possano dar luogo alla circolazione di una corrente inversa sulle stringhe a tensione minore.

3.3.4 Pericolo di elettrocuzione

La presenza di un generatore in tensione non interrompibile comporta che, durante le operazioni di spegnimento, sia da valutare la chiusura di un circuito elettrico con transito di corrente attraverso il corpo umano di un addetto allo spegnimento.

Questo perché il generatore fotovoltaico è un generatore in corrente continua: l'energia generata viaggia in corrente continua fino all'inverter, quindi al lato di monte dell'inverter. La tensione di ingresso all'inverter dipende dal numero di pannelli collegati in serie, e dall'inverter, l'energia esce in forma alternata, al lato di valle dell'inverter.

Il primo problema è il sezionamento delle linee elettriche: nel lato di valle, in corrente alternata, non vi sono particolari problemi per sezionare mediante interruttori; nel lato di monte, in corrente continua, il sezionamento richiede interruttori importanti, per via degli archi elettrici che si innescano in essi. È importante sottolineare che il sezionamento della linea in ingresso all'inverter comporta il raggiungimento della massima tensione da parte del generatore fotovoltaico, detta "tensione a vuoto".

Si suppone che la corrente alternata in uscita dall'inverter sia sezionabile tramite un dispositivo apposito. In tensione rimane quindi il solo lato di monte, in corrente continua. Affinché in un circuito vi sia circolazione di corrente, il circuito stesso deve essere chiuso su due punti del generatore aventi differente tensione, normalmente in corrispondenza dei morsetti del generatore. Se il circuito non è chiuso, il generatore presenta una tensione caratteristica sui suoi morsetti senza circolazione di corrente (tensione a vuoto). Quindi, perché vi sia elettrocuzione, un operatore deve diventare parte del circuito di guasto o di un circuito chiuso sui morsetti del generatore. La corrente massima che può erogare l'impianto consiste nella corrente di cortocircuito del singolo pannello, in quanto collegati in serie. Si ha quindi che, in caso di un cortocircuito di stringa, i conduttori ed i pannelli della stringa non possono essere sollecitati oltre il loro limite anche senza interruttori di protezione.

Vi sono due principali tipologie di guasto:

- Caso di guasto in una singola stringa;
- Caso di guasto su due stringhe.

Il rischio di elettrocuzione nel caso di spegnimento con acqua dolce risulta concreto nel caso ci si avvicini al generatore fotovoltaico al di sotto delle soglie considerate. Le distanze di sicurezza, considerando la tensione massima di 1000 Volt raggiungibile negli impianti FV, sono pari a 5 m per getto pieno ed 1 m per getto frazionato. Distanze pari a 7,5 m ed 1,5 m sono quindi tali da far considerare remoto il rischio di elettrocuzione.

3.3.5 Inneschi nelle “string boxes”

Gli inneschi nelle “string boxes”, cioè i quadri di stringa, sono dovuti a fenomeni di surriscaldamento per scarsa ventilazione, o per errata installazione, come quando si hanno componenti elettrici posizionati sul tetto in involucri metallici che possono raggiungere temperature critiche. Ad esempio, nel caso di un quadro stringa chiuso in una scatola metallica posizionata sulla gronda di lamierino, in estate l’esposizione al sole sommata al calore prodotto durante il funzionamento, porta i componenti ed i cavi al raggiungimento di temperature critiche, che in campo elettrico si raggiungono superando gli 80 °C. Un altro caso simile si ha quando un pannello in plexiglas va a comprimere in modo anomalo i connettori all’interno di un quadro stringa provocando fiamme e bruciature all’interno dello stesso.

La causa dei guasti dei quadri di stringa è da ricercarsi nella presenza di acqua all'interno degli stessi, a sua volta causata da due gravi errori costruttivi di installazione:

- Il posizionamento dei quadri esattamente alla fine della falda del tetto, in posizione tale da raccogliere grandi quantità di acqua in caso di pioggia;
- Il basso grado di protezione IP (di solito IP 65) dei quadri di stringa ne riduce la protezione all'acqua.

I quadri di stringa sono elementi in cui, una volta innescatosi un cortocircuito, le correnti iniettate vengono continuamente alimentate dal funzionamento dei pannelli stessi. Di conseguenza, si viene a creare una circolazione continua di corrente che porta alla riaccensione dell'incendio. Ciò può essere evitato solamente impedendo l'ingresso della corrente stessa nelle string boxes bruciate, sezionando i cavi in ingresso ed i cavi in uscita.

3.4 Test

Vengono adesso trattate alcune delle più comuni tecniche di prove eseguibili su moduli FV tradizionali, utili anche per evidenziare come invece tali metodologie spesso non siano adatte ad essere utilizzate per testare elementi BIPV integrati in facciata, dal momento che si riferiscono, nella maggior parte dei casi, alla situazione specifica di fotovoltaico applicato in copertura.

In generale, i valori di densità del flusso di calore e della temperatura della struttura su cui è applicato il fotovoltaico dipendono dal fatto che essa stia bruciando e se sia presente o meno un'apertura, dall'entità della densità del flusso di calore e della temperatura. Se tali valori sono elevati, sia il sistema fotovoltaico che la costruzione sono in grave pericolo.

Dal complesso delle attività svolte dalla RSE (Ricerca sul Sistema Energetico), in generale è stato notato come assumano particolare rilievo peculiarità quali: inclinazione dei moduli, inneschi particolarmente aggressivi (fiamma iniziale di potenza, dimensioni e durata rilevanti), presenza di ventilazione, configurazione realizzata (geometria) e combustibilità della copertura.

3.4.1 Prova di reazione al fuoco

In primo luogo, viene descritta una prima prova di reazione al fuoco su una porzione di pannello fotovoltaico, per analizzare il comportamento del provino sottoposto all'azione di una fiamma d'innescio in presenza di calore radiante.

La prova fornisce un'indicazione orientativa sulla reazione al fuoco di un materiale in una fase dell'incendio successiva a quella iniziale, in accordo con il D.M. 26 giugno 1984 "Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi". In particolare, la sperimentazione si propone di determinare la velocità di propagazione della fiamma lungo la superficie, la quantità di zona danneggiata e l'eventuale gocciolamento del campione sottoposto all'azione di una fiamma d'innescio in presenza di calore radiante, così come specificato nella modalità di prova prevista dalla norma UNI 9174 "Reazione al Fuoco dei prodotti sottoposti all'azione di una fiamma di innescio in presenza di calore radiante".

Per costituzione, i pannelli fotovoltaici presentano una griglia conduttrice che percorre tutta la superficie del silicio, necessaria al collegamento elettrico dei generatori elettrici elementari costituiti dalle celle fotovoltaiche. Tale griglia conduttrice è denominata comunemente "bus bar" e la sua distribuzione sulla superficie del silicio si sviluppa lungo una direzione principale proprio per assicurare ed ottimizzare il collegamento elettrico delle diverse celle costituenti il modulo; pertanto, ciascun pannello a favore di sicurezza viene considerato

avente comportamento al fuoco di tipo anisotropo lungo le due direzioni della superficie di silicio. Per tener conto del comportamento anisotropo, le prove di reazione al fuoco sono state condotte effettuando una campionatura del modulo originario con un taglio in senso longitudinale ed un altro in senso trasversale.

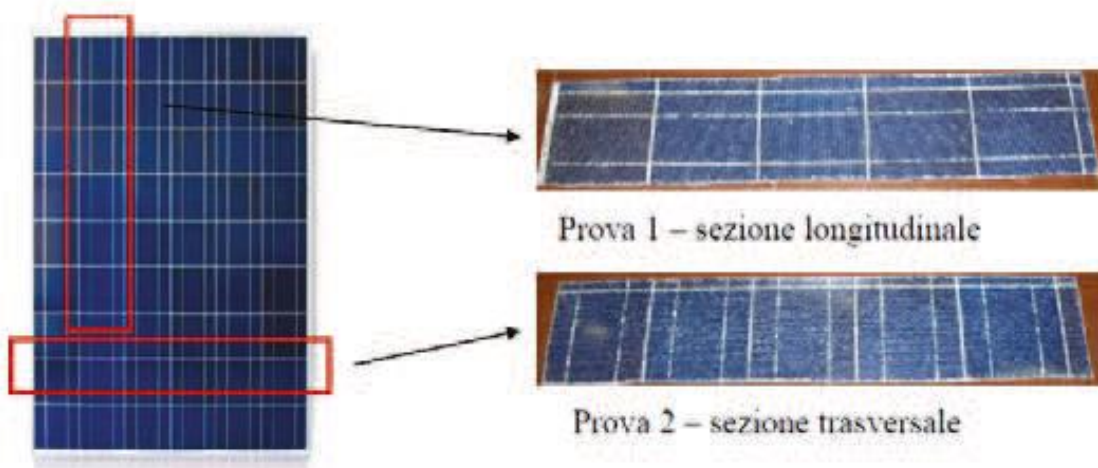


Figura 62 – Campioni sezionati dall'intero modulo, in modo tale da considerarne il comportamento anisotropo.

La prova di reazione al fuoco in questione è quella prevista dalla UNI 9174, la quale fornisce la velocità di propagazione della fiamma attraverso la misura del tempo con cui il fronte di fiamma tocca i traguardi verticali marcati ogni 50 mm sul campione. Dal rapporto tra lo spazio percorso dalla fiamma e il tempo impiegato a percorrerlo, si ricava la velocità con cui si propaga il fronte di fiamma sul campione. Tale velocità di propagazione è funzione del profilo di potenza che giunge sul campione, profilo che è decrescente dal bordo adiacente al pannello radiante verso il bordo più lontano.

Nella prova viene simulato uno scenario d'incendio in cui un materiale combustibile è innescato da una fiamma pilota di 8 cm di piccola potenza, pari a 120 W circa, in presenza di una fonte radiante costituita dal pannello la cui intensità media di emissione è pari a circa 6,2 W/cm², corrispondente ad una temperatura di circa 750 °C, che rappresenta un altro oggetto infiammato nelle

vicinanze ed il cui contributo in energia radiante costituisce un aggravio per la combustione del campione in esame. Pertanto, lo scenario d'incendio si sintetizza in una piccola fiamma fissa a contatto, che non insegue il fronte di combustione e che quindi provoca l'accensione del materiale, ed in una quota di energia di tipo radiante che è emanata dal pannello e raggiunge il campione secondo le leggi fisiche dell'irraggiamento. È da sottolineare che la quota di irraggiamento che giunge sul fronte di combustione diminuisce all'aumentare della distanza dal pannello radiante, in maniera inversa al quadrato della distanza dal pannello stesso.

Il modulo fotovoltaico utilizzato per la prova è composto da una copertura frontale in vetro, da celle policristalline e da una copertura posteriore di EVA, poliestere e Tedlar. Lo strato di EVA, come già detto, è costituito da un copolimero di etilene ed acetato di vinile che assolve alla funzione di protezione delle celle fotovoltaiche isolando la parte attiva ed eliminando gli interstizi fra le celle stesse. Il componente principale della parte posteriore del modulo, Backsheet, è realizzato da uno strato di polivinilfluoruro (PVF), comunemente noto con il nome di Tedlar.

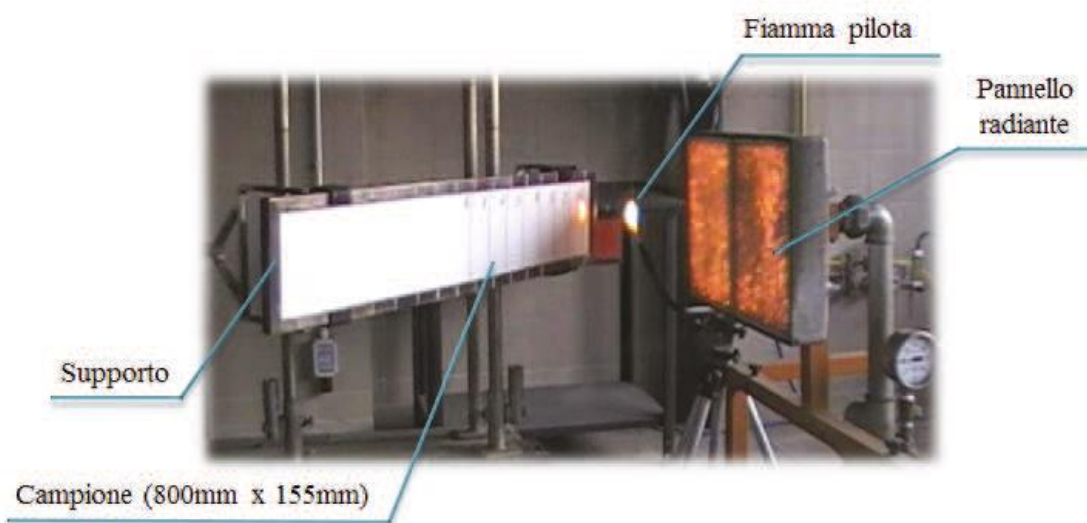


Figura 63 – Configurazione degli elementi per la realizzazione della prova di reazione al fuoco.

I campioni utilizzati, di dimensioni 800 mm x 155 mm, sono inseriti nel supporto incombustibile con la dimensione maggiore posta orizzontalmente e la superficie di prova rivolta verso il pannello radiante in posizione verticale a 45 ° rispetto allo stesso. L'estremità del provino più vicina al pannello radiante si trova ad una distanza di 100 mm da esso.

Nella procedura di prova descritta nella UNI 9174, ed a favore di sicurezza, si dispone il pannello fotovoltaico con la parte retrostante, costituita dai materiali combustibili (EVA e Tedlar) a diretto contatto con la fiamma d'innescò, perché è di maggiore interesse analizzare il comportamento della pellicola di Tedlar (materiale polimerico), piuttosto che porre la porzione di modulo fotovoltaico con la parte frontale, rivestita di vetro, in direzione del pannello radiante e della fiamma d'innescò. Sulla parte retrostante del pannello, inoltre, sono stati contrassegnati intervalli pari a 50 mm, in modo da poter riportare la velocità di propagazione della fiamma espressa in mm/min. Si è proceduto alla accensione del pannello radiante e si è atteso che la radiazione si stabilizzasse al valore prefissato di 62 kW/m². Si è poi regolata la fiamma pilota e, tramite una slitta, è stata avvicinata al porta campioni contenente la porzione di modulo fotovoltaico. Non appena la fiamma entra in contatto con il materiale in esame, il cronometro viene azionato per la registrazione dei tempi parziali impiegati dalla fiamma per raggiungere, di volta in volta, il fronte successivo.

Il fatto di leggere differenze tra il comportamento del materiale nel senso longitudinale e trasversale, conferma il comportamento anisotropo proprio dei moduli fotovoltaici, dovuto alla presenza del bus di collegamento elettrico delle diverse celle elementari costituenti il modulo.

Nel raggiungimento dei primi due fronti si può notare che la porzione di pannello con sezione trasversale ha assunto velocità di propagazione maggiore di quella

del campione con sezione longitudinale. La velocità di propagazione del primo campione, con sezione longitudinale, esaminato per percorrere i primi 50 mm è pari a 111 mm/min, mentre per percorrere i successivi 50 mm scende a 25 mm/min; invece la velocità del secondo campione, con sezione trasversale, per il raggiungimento del primo traguardo è di 227,27 mm/min, e del secondo traguardo è pari a 37,04 mm/min. Si nota che la velocità di propagazione del secondo campione è quasi doppia di quella del primo; questo può essere dipeso dal bus bar posto sulle celle, la cui presenza incide sullo sviluppo ed il successivo andamento della fiamma. Inoltre, si può evidenziare anche la differenza della velocità complessiva di propagazione della fiamma assunta nelle due prove; infatti, nel primo caso la velocità media totale è di 41,64 mm/min, mentre nel secondo è di 67,83 mm/min.

La zona danneggiata è l'estensione massima in lunghezza, espressa in mm, compresa tra l'inizio del campione e l'ultimo traguardo raggiunto dalla fiamma: questa misura è uguale in entrambe le prove, e corrisponde a 250 mm.

Il tempo di post incandescenza è il tempo, espresso in secondi, che trascorre dall'estensione della fiamma sviluppata oltre i 300 mm fino alla completa scomparsa dell'incandescenza. In entrambi i campioni, però, la fiamma non ha raggiunto il sesto traguardo, che corrisponde a 300 mm, quindi in ambedue le prove si considera il tempo di post incandescenza nullo.

Il gocciolamento è la tendenza di un materiale a lasciare cadere gocce e parti distaccate durante o dopo l'azione della sorgente di calore. Nel corso di entrambe le prove si è verificata la presenza di gocce sul materiale bruciato, ma considerando che queste non hanno raggiunto il pavimento dell'ambiente di prova ma si sono esaurite sul campione, non sono da considerarsi una fonte di innesco aggiuntiva. Infatti, vengono ritenute pericolose solamente gocce o parti

distaccate che raggiungono il pavimento dell'ambiente di prova infiammate e che continuano ad ardere per più di tre secondi.

In entrambe le prove si è verificato un fenomeno di “sfogliamento” della pellicola di Tedlar che ricopre la parte posteriore del pannello. Infatti, la reazione a fuoco di questo materiale non è di fusione, bensì di distacco dagli altri strati con conseguente perdita di adesione.

Nelle zone non ancora investite dalle fiamme, in entrambi i campioni esaminati, si rileva formazione di bolle tra uno strato e l'altro del pannello fotovoltaico. Il fenomeno della formazione delle bolle, nel caso di impianti fotovoltaici in servizio, è un effetto non desiderato denominato nella letteratura tecnica di settore come “hot spot”, dove il riscaldamento avviene quando il modulo fotovoltaico risulta essere ombreggiato rispetto ad elementi in parallelo e, generando una tensione inferiore, diventa carico per gli altri elementi generatori. La corrente inversa percorsa nel modulo in ombra riscalda per effetto Joule il modulo stesso ed il calore prodotto comporta la caratteristica formazione di bolle nel backsheet.

Nella prova di reazione al fuoco, di particolare interesse è l'altezza assunta dalle fiamme che investono il campione nelle prime fasi della prova: infatti l'altezza delle fiamme aumenta il rischio di diffusione dell'incendio ad elementi circostanti i moduli fotovoltaici; ma allo stesso tempo, si è anche riscontrato che la fiamma tende ad auto estinguersi sul pannello fotovoltaico stesso grazie ai materiali di cui è composto.

L'altezza delle fiamme è un aspetto molto importante da considerare nell'analisi della reazione al fuoco di un materiale: in questo caso le fiamme hanno raggiunto anche un'altezza superiore al 100% dell'altezza stessa del provino; la fiamma mantiene tale caratteristica in entrambi i campioni fino al raggiungimento del

terzo fronte, mentre nei traguardi successivi tende a diminuire fino all'autospegnimento dopo il quinto traguardo. Un'altezza così elevata della fiamma può essere fonte di propagazione d'incendio da un pannello a un altro o in materiali circostanti l'impianto fotovoltaico.

La prova ha messo in risalto, inoltre, che la fiamma non ha perforato il pannello fotovoltaico: durante le prove, la fiamma non ha mai oltrepassato le celle e lo strato di vetro che compongono la parte anteriore del modulo fotovoltaico, ma ha avanzato fino al quinto fronte bruciando solo la parte retrostante del modulo, ovvero il lato esposto alla fiamma d'innescò e al pannello radiante. La fiamma è poi terminata spontaneamente, bruciando solo una porzione del campione sottoposto alla prova e determinando quindi una buona predisposizione all'auto estinzione dei materiali componenti il pannello fotovoltaico.

La combustione del backsheet e del foglio di EVA non ha la potenza necessaria per propagare la fiamma sull'altro lato del pannello, quello con il vetro. Ciò è dovuto verosimilmente alla mancanza di ossigeno nello strato di EVA incapsulato fra il vetro e lo strato di silicio.

Il pannello è anisotropo, ovvero si comporta in modo diverso in funzione all'orientamento della griglia. Ciò comporta che la propagazione sarà diversa in funzione della disposizione della griglia interna.

La velocità di avanzamento di una combustione nello scenario reale risulta principalmente verso l'alto e non laterale. Avendo la fiamma direzione dal basso verso l'alto, si ha che la fiamma nello scenario reale investirà il materiale combustibile, fino al bordo superiore del pannello. Allontanandosi dalla fonte di innescò si evidenzia che il materiale bruciando genera una fiamma di potenza tale da non consentirne autonomamente la propagazione.

3.4.2 Prova al cono calorimetrico

Una seconda prova è quella al cono calorimetrico, il cui scopo è quello di definire il flusso critico, ossia il più basso carico termico per unità di superficie in grado di avviare una combustione, con accensione pilotata.

La prova al cono calorimetrico è stata effettuata in accordo con la norma ISO 5660, ed è specifica per determinare il contributo che il materiale testato può dare alla produzione di calore quando si sviluppa un incendio; inoltre, permette di determinare il rilascio di calore caratteristico dei materiali sotto esame e informazioni sulla combustione, come la velocità di rilascio calore e l'effettivo calore di combustione.

Tale prova si effettua mediante un cono calorimetrico detto "equipment noselab": questo strumento misura il consumo di ossigeno che avviene durante la combustione dei materiali, fornisce informazioni sulla velocità di rilascio del calore, l'effettivo calore di combustione, la velocità di perdita di massa, il tempo di accensione, la densità dei fumi, il campionamento di nerofumo, l'uscita di gas tossici, la produzione di CO₂, la produzione di CO, ed il tempo di innesco. L'innesco della combustione viene provocato da una sorgente di calore, di forma tronco conica, controllata nel suo irraggiamento fino ad un massimo di 100 kW/m². Si tratta di un innesco pilotato, in quanto il macchinario è dotato di un sistema di accensione a scintilla.

Nella prova al cono calorimetrico effettuata, il parametro di interesse principale è il flusso critico, definito come il più basso carico termico per unità di superficie in grado di avviare una combustione per un dato materiale, mediante accensione pilotata che, solitamente, nei materiali solidi, varia tra gli 8 e i 22 kW/m². L'innesco del provino scaturisce dall'unione di gas combustibile, prodotto dal provino stesso a causa del flusso di calore, e ossigeno. Sopra al provino è situato

il sistema di accensione a scintilla, che ha la funzione di pilotare l'innesco di tali gas. Come da norma, durante queste prove si pongono i campioni a 2,5 cm dall'estremità inferiore del cono calorimetrico. Dato che sarebbe stato di scarso interesse rivolgere la parte frontale del pannello fotovoltaico verso il cono stesso, in quanto il vetro è un materiale incombustibile, si effettua la prova ponendo i provini rivolti con il backsheet verso tale cono. La norma prevede che la prova termini, in caso di combustione, al completo spegnimento della fiamma, mentre in caso contrario dopo venti minuti dall'inizio della prova stessa.

Con questa prova, è quindi possibile studiare diversi parametri come: tempo di innesco, perdita di massa, tasso di rilascio di calore, concentrazione di monossido di carbonio (CO) e di anidride carbonica (CO₂).

In generale, più aumenta il tempo di innesco, più tempo ci vuole per far avvenire un incendio. Il tempo di innesco di un modulo FV viene determinato sperimentalmente come il ritardo dall'inizio del test all'apparizione di una fiamma consistente sulla superficie del provino. L'aumento del flusso di calore induce una rapida diminuzione del tempo di innesco. La curva del tempo di innesco raggiunge l'asintoto verticale che intercetta l'asse delle x in un punto che corrisponde al flusso di calore critico (CHF – “Critical Heat Flux”); CHF è definito come il valore minimo di flusso di calore sotto il quale non si ha fiamma.

Con la prova al cono calorimetrico si è inoltre potuto constatare che la porzione di modulo fotovoltaico sopporta elevatissimi valori di irraggiamento prima che avvenga l'accensione.

Il tasso del rilascio di calore (HRR – “Heat Release Rate”) è il parametro più significativo per la valutazione del comportamento al fuoco dei materiali, e rappresenta il tasso di energia termica generata attraverso la combustione, che controlla la crescita del fuoco come anche la quantità di fumo e gas generati.

L'HRR è dunque la velocità con cui il calore viene generato dal fuoco in Joule al secondo (Watt).

Durante la fase iniziale dell'incendio si ha un ovvio aumento di peso dei provini, probabilmente a causa dell'ossidazione. Inoltre, il modulo fotovoltaico presenta un più lungo periodo di aumento di peso sotto un flusso di calore minore. Questo perché i prodotti dell'ossidazione, che sono relativamente più pesanti, iniziano a decomporsi quando la temperatura aumenta fino ad un certo livello. Si può concludere che esporre materiali a flussi di calore elevati è molto pericoloso.

3.4.3 Test del modulo FV nel suo insieme

Un'ulteriore tipologia di test è quella che studia il modulo fotovoltaico nel suo insieme; tale prova viene concepita allo scopo di valutare moduli FV inclinati di 30° su una copertura, in presenza di un incendio originatosi sul tetto stesso, all'esterno del modulo; di conseguenza, si sviluppano due scenari di prove:

- Fuoco al di sopra del modulo: per simulare il caso di fuoco dall'esterno, il bruciatore è stato applicato alla parte anteriore del pannello;
- Fuoco al di sotto del modulo: il bruciatore è applicato dall'interno e il lato posteriore risulta essere quello esposto.

Per ogni test sono stati valutati: tempo di emissione del fumo ed eventi quali la caduta di detriti ardenti, gocciolamento, rottura del vetro e completa penetrazione del pannello ("burn-through").

Ai fini di eseguire questo tipo di prova, sono stati messi a confronto tre tipi di pannelli solari con moduli in silicio, tutti e tre con uno strato di etilene vinil acetato (EVA) utilizzato per racchiudere le celle fotovoltaiche:

- Film spessi in silicio monocristallino con cornice in alluminio e aventi struttura vetro-plastica: uno strato di vetro sul lato anteriore e uno strato di materiale plastico sul lato posteriore;
- Film spessi in silicio policristallino con cornice in alluminio e aventi struttura vetro-plastica;
- Film sottili in silicio amorfo senza cornice e con struttura vetro-vetro.

Nel caso di fuoco dal di sopra del modulo, si osserva che:

- Mentre le temperature sulla parte anteriore erano tra gli 800 e i 1000 °C per tutti i materiali, la temperatura sulla parte posteriore dipendeva dal tipo di costruzione (vetro-plastica oppure vetro-vetro);
- Pannello con struttura in vetro-plastica: si verifica una combustione intensa del backsheet in plastica con considerevole gocciolamento e caduta di detriti infiammati al suolo, evento che potrebbe portare ad un'ulteriore propagazione delle fiamme. Inoltre, si registra una quantità notevole di fuliggine e fumo risultanti dalla combustione e costituenti un rischio aggiuntivo. Il backsheet in plastica presenta il maggior carico di incendio;
- Pannello con struttura in vetro-vetro: in questo caso si osserva un comportamento diverso dovuto all'assenza di plastica del backsheet, con assenza di gocciolamento ma presenza solo di caduta di detriti infuocati. Il carico di incendio è sullo strato EVA.

Per quanto concerne invece la configurazione con il fuoco al di sotto del modulo, si evince che il danno ad un modulo policristallino è maggiore a causa della combustione del backsheet in plastica, più lunga e intensa rispetto al caso vetro-vetro.

Il burn-through si verifica molto prima nel caso di fuoco proveniente dal di sotto (entro 3 minuti), rispetto al caso di fuoco proveniente dal di sopra (entro circa 7 minuti).

3.4.4 Test del comportamento di vetro e incapsulante

Variabili molto importanti da tenere in considerazione a proposito del rischio di incendio dei moduli fotovoltaici sono il grado di indurimento del vetro e il tipo di pellicola incapsulante utilizzata.

Sulla base dei risultati ottenuti da diversi test sul comportamento di vetro ed incapsulante dei moduli FV in caso di incendio, è stato possibile sviluppare un modello di eventi che conducono a danni irreversibili, laddove le tappe critiche consistono in:

- a. generazione di tensione nel vetro dovuta all'espansione termica;
- b. rottura del vetro;
- c. fuoriuscita di gas volatili attraverso le fessure del vetro seguita da avvio di combustione al di sopra del vetro e nel laminato.

Si è rilevato che il fattore più importante nella diffusione del fuoco è costituito dalla rottura del vetro, il quale costituisce l'isolante termico primario che protegge sia gli incapsulanti che il backsheet dal fuoco. Anche il grado di indurimento dell'incapsulante si è rivelato avere un ruolo fondamentale nel determinare l'andamento dell'incendio. Infatti, incapsulanti non

sufficientemente induriti possono aumentare la probabilità di fessurazione del vetro dovuta alla pressione esercitata dai componenti volatili.

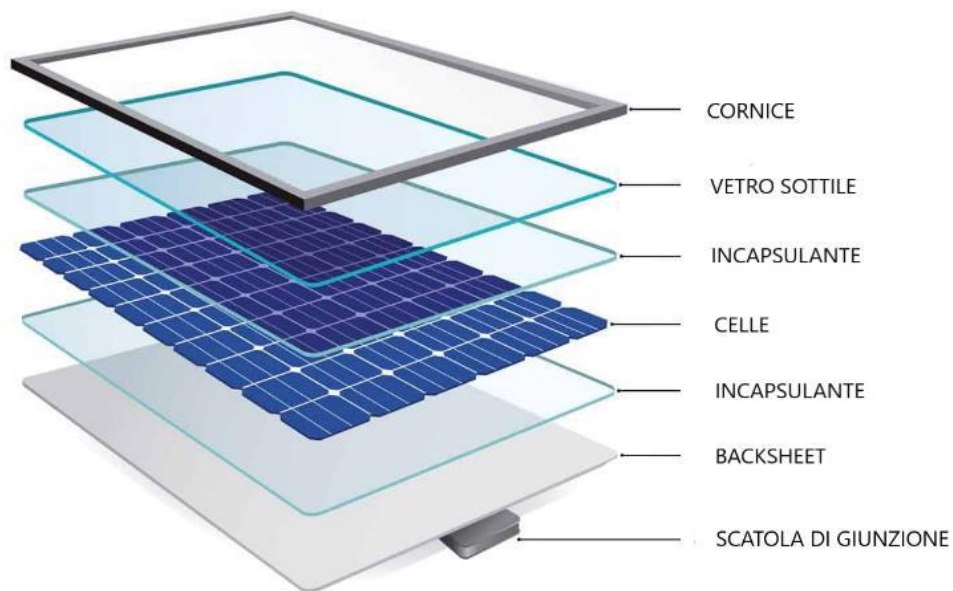


Figura 64 – Layers costituenti un pannello FV.

4. Confronto fra FV in copertura e in facciata

Una volta descritti complessivamente il funzionamento generale ed il comportamento al fuoco dei convenzionali moduli FV, tipicamente applicati in copertura, è possibile passare al confronto di tali sistemi con elementi BIPV integrati verticalmente nelle facciate degli edifici, descrivendone opportunamente le principali differenze.

In primo luogo, sulle coperture degli edifici spesso si trovano evacuatori di fumo e di calore (EFC), utili a rimuovere i gas fumogeni caldi dalla parte alta del locale contenente l'incendio e a reintrodurre aria relativamente fresca e incontaminata, prelevata da spazi adiacenti o dall'ambiente esterno, all'interno del locale nella sua parte più bassa. Dal momento che un lucernario si comporterebbe come un EFC in caso di incendio, la prossimità dei moduli FV ai lucernari rappresenta una comoda maniera per diffondere l'incendio dal compartimento sottostante al campo fotovoltaico sul tetto. Inoltre, allo stesso modo, un incendio generato dai moduli FV potrebbe diffondersi al compartimento inferiore all'interno dell'edificio mediante lucernari ed EFC. Per questo motivo è importante mantenere una distanza di almeno 1 m, fra qualsiasi componente del sistema FV e queste aperture.



Figura 65 – Caso di diffusione di un incendio al compartimento inferiore mediante lucernario.

Lo stesso meccanismo si ha nel caso di pannelli FV collocati in facciata, in cui le aperture (porte e finestre) rivestono un ruolo di possibile mezzo di propagazione dell'incendio, dall'esterno verso l'interno e viceversa.

La soluzione migliore da adottare per mitigare il rischio di diffusione dell'incendio e di propagazione delle fiamme è quella di installare il campo fotovoltaico su strutture come coperture e/o facciate incombustibili (Classe 0 secondo il DM 26/06/1984 o Classe A1 secondo la EN 13501-1 standard), oppure di interporre fra il modulo FV e la struttura un materiale resistente al fuoco (almeno EI 30) con uno strato intermedio incombustibile.

Nonostante ciò, bisogna considerare che, come è facile da intuire, installare un pannello FV in copertura non è rischioso come installarlo verticalmente su una parete o in una facciata a doppia pelle, dal momento che, in questo caso, i moduli aumenterebbero il rischio di incendio per gli occupanti all'interno dell'edificio. Lo scenario di rischio sarebbe quindi differente rispetto a quando il sistema FV viene semplicemente montato in copertura.

I moduli fotovoltaici installati in facciata vengono dunque spesso esposti alle fiamme provenienti da incendi interni all'edificio che attraversano le finestre. Di conseguenza, questi alti valori di flusso di calore radiativo, in primo luogo accendono i componenti combustibili dei pannelli fotovoltaici, e successivamente emettono gas molto tossici.

In generale, si può dire che il pericolo di diffusione di un incendio in facciata è superiore in caso di incendio che si propaga dall'interno dell'edificio all'esterno, rispetto al caso di incendio innescato all'esterno dell'edificio.

5. BIPV in facciate ventilate

Dopo aver ampiamente trattato il comportamento al fuoco delle facciate ventilate e dei moduli fotovoltaici tradizionali, è bene approfondire tale argomento soffermandoci sui sistemi BIPV, sul loro generico funzionamento e sullo specifico comportamento in caso di integrazione come elementi di rivestimento in edifici con facciata ventilata.

5.1 Premessa

La tendenza odierna negli edifici di nuova costruzione è volta all'ottenimento di un involucro dalle prestazioni variabili, il cosiddetto "adaptive building skin" o "interactive envelope". La realizzazione di un involucro dinamico rappresenta la via futura più promettente al fine di garantire una risposta efficace alle variazioni climatiche esterne, sia a livello stagionale che durante l'arco di una stessa giornata, in modo tale da ottenere condizioni ambientali interne ideali, senza una massiccia spesa energetica. A tal fine, l'involucro di un edificio rappresenta un ambito di sperimentazione particolarmente adatto per quanto concerne l'integrazione di sistemi impiantistici, ad esempio per quanto riguarda la ventilazione degli ambienti e/o lo sfruttamento di fonti energetiche rinnovabili.

L'involucro ha quindi un impatto dominante sull'equilibrio energetico dell'edificio, e riveste un ruolo fondamentale nei confronti dei "nearly Zero Energi Buildings" (nZEB).

Considerando la sfida relativa alla decarbonizzazione da parte del settore edile, con un obiettivo europeo pari all'80 % entro il 2050, l'involucro di un edificio dovrebbe integrare una serie di funzionalità attive in termini di produzione energetica, come raccolta, conversione, stoccaggio e distribuzione. Questo perché il settore edile gioca un ruolo centrale nella prospettiva di sostenibilità

ambientale, contribuendo per il 36 % al consumo energetico globale e per il 39 % alle emissioni di anidride carbonica, includendo la generazione di energia a monte. A questo proposito, le facciate degli edifici spesso costituiscono potenzialmente la più grande superficie sfruttabile per l'integrazione di componenti di generazione di energia rinnovabile all'interno di aree urbane.

Oggigiorno, un processo di progettazione sostenibile ha come obiettivo la costruzione di edifici molto performanti, efficienti da un punto di vista energetico e fattibili in termini economici e salubri, sfruttando saggiamente risorse rinnovabili in modo tale da minimizzare l'impatto sull'ambiente e ridurre il più possibile la richiesta energetica.

L'innovazione tecnologica ha pertanto messo a disposizione nuovi materiali e sistemi da utilizzare nelle soluzioni di involucro edilizio: alcuni di tipo passivo, in grado cioè, grazie semplicemente alla particolare forma, di modificare la quantità di energia trasmessa, sia luminosa che termica, in funzione dell'inclinazione dei raggi solari, e altri di tipo attivo, che possono cioè modificare la quantità di energia trasmessa in funzione di stimoli esterni forniti al sistema. A ciò si aggiungano materiali o prodotti innovativi che, rispetto a quelli tradizionali, sono in grado di garantire, grazie a proprietà intrinseche, elevate prestazioni a fronte di spessori assai ridotti.

5.2 BIPV - Building Integrated Photovoltaic

L'Unione Europea ha stabilito che tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno avere un consumo netto di energia quasi nullo entro il 2020. A tale scopo, incorporare sistemi di generazione di energia rinnovabile negli edifici, come ad esempio i sistemi fotovoltaici, risulta una strada furbamente percorribile.

Nel 2017 l'elettricità fotovoltaica era responsabile di circa il 10 % della produzione totale di energia rinnovabile nei 28 Stati membri dell'Unione Europea.

A tal proposito, i sistemi BIPV "Building Integrated Photovoltaic" stanno guadagnando enorme popolarità per quanto riguarda la produzione di energia, anche perché permettono di ridurre il fabbisogno di terreni per le installazioni FV solari "off-site". Pertanto, la generazione di energia FV può essere considerata un punto chiave per ottenere una profonda decarbonizzazione, con un simultaneo alto grado di elettrificazione nel 100 % degli scenari energetici che presentano fonti di energia rinnovabile (RES - "Renewable Energy Sources").

A differenza dei sistemi FV integrati, i moduli FV tradizionali, appoggiati in superficie, vengono solitamente installati sulle coperture, a causa della struttura relativamente pesante dei moduli fotovoltaici in silicio; inoltre, risentono ancora del loro colore blu, che rende più complicata l'integrazione nelle facciate degli edifici. Un altro aspetto importante consiste appunto nel fatto che gli edifici alti, come ad esempio grattacieli destinati ad uffici, semplicemente non possiedono coperture abbastanza grandi per soddisfare i requisiti di performance energetica mediante l'utilizzo dei moduli FV convenzionali. Questo porta naturalmente il progettista ad optare per lo sfruttamento della facciata con sistemi BIPV.

In generale, i prodotti BIPV, divenuti commercialmente disponibili negli anni '90, sono stati progettati in modo specifico per essere integrati nell'involucro dell'edificio, ma generalmente possono essere integrati facilmente anche in copertura, divisori esterni dell'edificio, facciate semitrasparenti, finestre e sistemi di oscuramento.

Nonostante i sistemi fotovoltaici in facciata ricevano meno irradiazione rispetto che le installazioni di copertura o di pavimento, essi offrono minori variazioni

giornaliere e stagionali, e possono quindi contribuire in modo sostanziale alla generazione locale di elettricità. La tecnologia fotovoltaica può essere quindi integrata nell'involucro dell'edificio, dove i convenzionali materiali da costruzione possono essere facilmente sostituiti da moduli FV.

In termini costruttivi, dunque, i sistemi BIPV devono rivestire lo stesso ruolo degli elementi tradizionali di rivestimento per facciate e coperture che vanno a sostituire. Di conseguenza, essi devono ricoprire tutte le tipiche questioni di un prodotto da costruzione, come l'aspetto, la resistenza alle intemperie, il carico del vento, la vita utile dei materiali e i rischi e conseguenze degli aspetti di sicurezza (costruzione, fuoco, elettricità, ecc.).

Il principio basilare di un sistema BIPV è quello di utilizzare i moduli fotovoltaici come componenti dell'edificio; in questo modo, i moduli BIPV diventano uno strato multifunzionale dell'edificio, non solo per essere integrati fisicamente e funzionalmente, ma anche per costituire una possibilità innovativa per quanto riguarda la progettazione degli involucri edilizi. Un elemento BIPV per facciate deve tener conto delle proprietà di isolamento termico, di fattori come la trasparenza, in modo tale da permettere guadagni solari quando possibile o un buon controllo solare se necessario, e degli aspetti collegati alle condizioni climatiche e al comfort da raggiungere.

Un modulo FV può quindi essere considerato come un BIPV se prende parte all'integrità e totalità delle funzionalità dell'edificio. In altre parole, quando un modulo FV integrato nell'edificio viene smontato, deve essere sostituito da un componente edilizio adeguato. Questo significa che i moduli BIPV devono essere capaci di ricoprire una o più delle seguenti funzioni:

- Rigidezza meccanica e integrità strutturale;

- Protezione nei confronti dei principali impatti metereologici: pioggia, neve, vento;
- Economia energetica, come oscuramento, illuminazione naturale, isolamento termico;
- Protezione al fuoco;
- Isolamento acustico.

Inoltre, gli elementi fotovoltaici integrati possono essere utilizzati sia in modo autonomo che insieme ad altri materiali da costruzione (come vetro, metallo, calcestruzzo, legno, ceramica, ecc.), sia in superfici opache che semitrasparenti. Affinché sia un prodotto invitante e competitivo, il fotovoltaico deve essere “integrato” e/o progettato per rientrare nelle necessità dell’architetto.

L’integrazione estetica di tali sistemi costituisce spesso un comune argomento di discussione, essendo ovviamente una criticità: per essere gradevoli da un punto di vista architettonico, i moduli BIPV devono trovarsi in armonia con l’intera immagine dell’edificio, quindi tenendo in considerazione colore, consistenza, dimensione e posizione.

Gli elementi BIPV possono influire sull’orientamento, impronta, layout e forma dell’edificio, e anche sui materiali da costruzione, dal momento che possono comportarsi come importanti elementi costruttivi per l’involucro, e spesso fanno parte della facciata dell’edificio. Molti rivestimenti FV possono essere realizzati mediante pannelli in vetro a cui vengono applicate celle FV per dare vita alla vasta gamma di facciate trasparenti. Inoltre, i moduli possono essere facilmente incorporati in altri sistemi, come i rivestimenti antipioggia.

I moduli semitrasparenti, utilizzati come parti di finestre, facciate ed elementi oscuranti, sono molto utilizzati per motivi estetici, dal momento che permettono

la penetrazione della luce solare nelle superfici dell'edificio e all'interno. Più sono trasparenti i moduli solari FV, meno però sarà l'efficienza energetica del sistema BIPV. L'uso di moduli BIPV semitrasparenti nelle finestre comporta punti focali di dispersione della luce e, inoltre, una superficie libera per l'installazione fotovoltaica; infatti, i moduli BIPV possono essere utilizzati come parte di finestre creando una facciata semitrasparente. La trasparenza viene ottenuta, o tramite una tecnologia BIPV con pellicola sottile e flessibile, o mediante una tecnologia BIPV in silicio cristallino. Infine, i moduli BIPV semitrasparenti possono essere usati, di diverse forme, come componenti oscuranti sopra finestre, o come rivestimento della struttura.

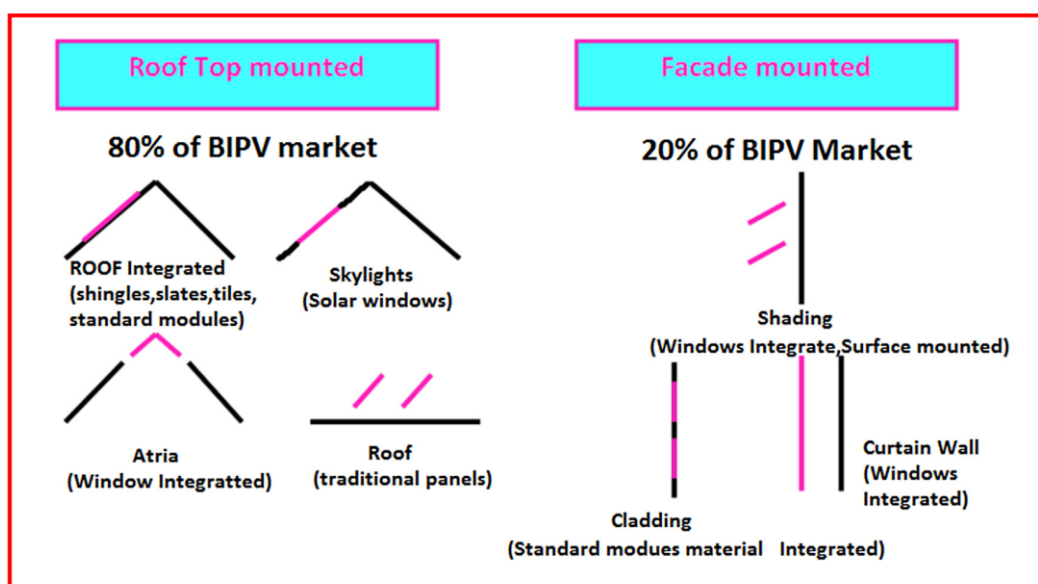


Figura 66 – BIPV in copertura ed in facciata.

Un sistema BIPV completo deve includere:

- i moduli BIPV;
- un controller di carica, in modo da regolare l'energia in ingresso e in uscita dalla batteria di stoccaggio (nei sistemi "off-grid");
- un sistema di stoccaggio dell'energia;

- un'apparecchiatura di conversione dell'energia, comprendente un inverter in modo da convertire la corrente continua DC dei moduli BIPV in corrente alternata AC, compatibile con la rete;
- un alimentatore di riserva come un generatore diesel;
- un hardware di montaggio e supporto, con cablaggio DC e AC e disconnessioni di sicurezza.

Ovviamente, una facciata con un sistema BIPV richiederà più manutenzione rispetto ad una facciata tradizionale, in modo tale da poter assicurare la performance elettrica dell'intero sistema fotovoltaico.

Secondo uno studio, nella maggior parte dei casi di fotovoltaico in facciata, vengono utilizzati sistemi BIPV piuttosto che BAPV "Building Added PV", cioè quei sistemi in cui i moduli FV sono montati sull'involucro di un edificio senza però adempiere alle funzioni dei BIPV, e quindi l'integrità della funzionalità dell'edificio è indipendente dall'esistenza di moduli fotovoltaici integrati.

Inoltre, il 75 % dei casi studiati con moduli BIPV integrati, riguardano soluzioni per facciate di edifici di nuova costruzione, mentre il restante 25 % corrisponde a soluzioni di ristrutturazione, che solitamente utilizzano l'approccio di BAPV.

Realizzare ristrutturazioni includendo elementi BIPV avrebbe però il doppio vantaggio di combinare un ammodernamento energetico, col fine di ridurre la domanda di energia, con la generazione fotovoltaica, per raggiungere il quantitativo di energia necessaria.

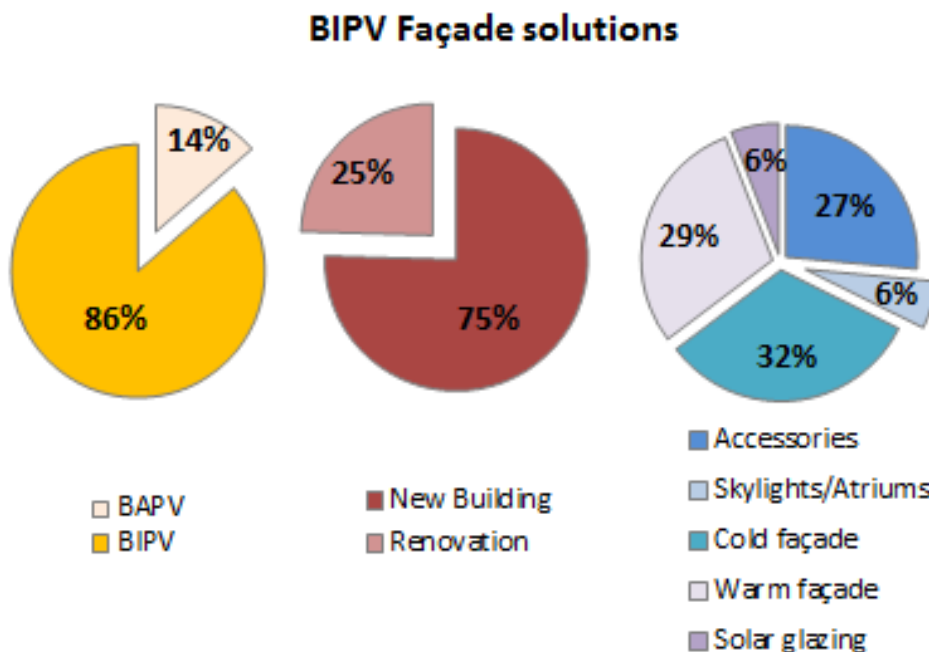


Figura 67 – Grafici a torta rappresentativi dei vari utilizzi dei sistemi BIPV.

Infine, è importante ricordare che, in diversi campi, vi è ancora la necessità di una standardizzazione internazionale riguardo le caratteristiche multifunzionali dei moduli e sistemi BIPV.

5.3 Confronto fra BIPV e moduli FV tradizionali

Per prima cosa, si può fare una distinzione piuttosto generale fra i moduli FV convenzionali e gli elementi BIPV:

- Moduli convenzionali:
 - Sono definiti come “prodotti elettrici” da una serie di norme standard IEC e UL, accettate quasi a livello mondiale;
 - Sono quindi standardizzati come “oggetti” a pieno titolo, in modo “omogeneo” a livello internazionale;
- Moduli BIPV integrati sul costruito:
 - Sono soggetti non solo alla serie di norme standard relative al fotovoltaico, come IEC 61215:2016, IEC 61730:2016 e IEC TS

62915:2018, ma la loro installazione comporta anche che vengano applicati standard, regole e requisiti di costruzione;

- I requisiti sui moduli BIPV vengono imposti, spesso in modo legale e vincolante, dall'ambiente, dalla posizione, dall'installazione e dall'utilizzo.

Ciò significa che i moduli BIPV coinvolgono non solo l'oggetto in sé, ma anche il contesto in cui si trovano:

- La posizione geografica e l'altezza dell'edificio modificano le richieste delle caratteristiche dell'elemento BIPV per quanto riguarda la sua capacità di affrontare le risultanti forze naturali, come carico da neve e da vento, calore, grandine e requisiti di sicurezza antincendio;
- L'ubicazione all'interno dell'edificio e la tipologia dell'edificio possono modificare i requisiti relativi, ad esempio, alle classi e certificati di sicurezza antincendio richiesti, nonché alla resistenza strutturale ed ai relativi test;
- I codici (leggi) e gli standard di costruzione nazionali e regionali potrebbero stabilire requisiti diversi.

Tornando alla copertura superficiale, i moduli FV tradizionali vengono progettati per massimizzare l'area fotovoltaica attiva per modulo, in modo tale che le aree non attive (opache o trasparenti) tra le celle ed intorno ad esse, vengano ridotte alle dimensioni minime necessarie per garantire l'isolamento elettrico. Al contrario, i moduli BIPV destinati a trasmettere luce e/o radiazione solare in un edificio, includono anche aree trasparenti o traslucide non trascurabili.

I moduli BIPV, sia rigidi che flessibili (film sottile), nonostante possano essere anche molto sottili, presentano lunghezze di diversi metri. Per questo motivo, a

differenza dei moduli FV convenzionali, implicano difficoltà nella realizzazione di test di prova sia in laboratorio che in procedure di misurazione all'aperto, e problemi relativi al trasporto. Di conseguenza, i moduli BIPV rischiano di essere più vulnerabili quando esposti a vibrazioni e shock durante il trasporto dal sito di produzione a quello di installazione, ed è quindi molto importante analizzare adeguatamente questo fenomeno.

A differenza del caso di moduli FV tradizionali, una caratteristica e sfida dei prodotti BIPV consiste nella variazione di dimensione, design e formati, spesso necessaria per soddisfare i requisiti di progettazione architettonica e per essere in linea con le dimensioni degli edifici. Questi moduli BIPV su misura sono per lo più prodotti in vetro-vetro con silicio cristallino o a film sottile. Se, in questo caso, venissero applicate le rigide regole che riguardano la definizione ed il collaudo elettrico dei moduli FV convenzionali, questo rappresenterebbe un grosso ostacolo al fatto di portare sul mercato in modo sicuro, economico ed affidabile moduli BIPV testati ed approvati "customizzati" e/o progettati individualmente. Inoltre, i moduli BIPV presentano molte tipologie diverse di metodi di montaggio e di sottostrutture, come anche la possibilità di realizzare superfici curve. È però necessario prendere in considerazione una maggiore flessibilità e varie opzioni riguardanti le differenze di progettazione, al fine di ottenere standardizzazione, test e certificazione di questi moduli BIPV; questo poi influisce sulla verifica delle proprietà elettriche, meccaniche ed ottiche.

Inoltre, il fatto che la scatola di giunzione, in un sistema BIPV, generalmente viene nascosta nello spazio compreso tra il modulo e la superficie sottostante, rende più difficile l'accesso da parte di personale specializzato rispetto all'installazione di BAPV. Ciò impedirà l'ispezione, ad esempio, mediante una

telecamera IR, aumentando di conseguenza il rischio di guasti elettrici non rilevati.

Infine, in molti casi di utilizzo di elementi BIPV si registra una temperatura media più alta; questo parametro è molto importante quando si tratta, ad esempio, di una vetrata isolante, che ha lo scopo di fornire quindi un buon isolamento termico dell'edificio. Le celle sono posizionate nello spazio presente fra i vetri, dove la mancanza di ventilazione in corrispondenza della superficie posteriore spesso si traduce in alti valori di temperatura che possono avere un grande impatto sulla tensione delle celle. In questo, come in altri casi di installazione senza ventilazione e con isolamento posteriore, si ottengono quindi temperature molto diverse rispetto al caso di FV indipendente. In alcuni casi, è possibile raggiungere una temperatura media più bassa favorendo un elevato scambio termico mediante effetti conduttivi, convettivi e radiativi.

Di seguito viene riportato un confronto tra un modulo fotovoltaico tradizionale e un prodotto BIPV avanzato:

➤ Modulo FV convenzionale:

- Relativamente comune in tutto il mondo, e di conseguenza vi sono molte infrastrutture;
- L'efficienza dei pannelli è aumentata nel tempo, mentre il prezzo è diminuito;
- Durabilità fino a 25 o 30 anni, continuando a funzionare ad una capacità più o meno nominale;
- Standard industriali sviluppati e ben conosciuti dagli installatori;
- Facilmente installabili in copertura senza richiedere alcuna revisione strutturale;
- Grandi, rettangolari, poco attraenti esteticamente;

- Opzioni di posizionamento limitate generalmente in copertura o, se possibile, montati in piano.

➤ Prodotto BIPV avanzato:

- Mercato ridotto, molte tecnologie sono ancora in fase di sviluppo e non sono competitivi da un punto di vista economico in confronto ai pannelli convenzionali;
- Infrastrutture, norme e competenze ancora da sviluppare;
- Esteticamente piacevoli, possono esser facilmente integrati nell'edificio e dargli un aspetto elegante e moderno;
- Possono sostituire quasi tutti i materiali per l'esterno dell'edificio e quindi ridurre i costi a lungo termine grazie al risparmio energetico.

5.4 Test riguardanti la sicurezza al fuoco sui BIPV

I moduli BIPV devono soddisfare i requisiti stabiliti nelle norme di costruzione locali e nazionali. In alcuni paesi, come in Germania, viene richiesta l'esecuzione di un test riguardante la copertura dell'edificio. Tuttavia, quando la copertura realizzata con moduli BIPV è sufficientemente lontana dagli edifici adiacenti, questo test non è necessario.

Per quanto riguarda invece l'installazione in facciata, la classe richiesta di resistenza al fuoco dipende da:

- Tipo di edificio e uso;
- Altezza dell'edificio;
- Sistema costruttivo di facciata, considerato come elemento unico;
- Presenza di sprinkler nell'edificio.

Dati questi fattori, la classe di resistenza al fuoco richiesta per l'elemento BIPV può variare tra "nessun requisito" ed il requisito legalmente vincolante di "non

combustibile”, che la maggior parte dei prodotti BIPV non riesce a soddisfare a causa del materiale di laminazione incorporato.

I requisiti fondamentali relativi alla sicurezza antincendio non sono armonizzati però a livello internazionale e, se non vengono stabilite normative nazionali, i test utilizzati per i moduli FV convenzionali vengono applicati come set iniziale di test minimi per prodotti BIPV.

È necessario ottenere ulteriori miglioramenti combinando i requisiti dei BIPV come dispositivi elettrici (secondo gli standard IEC) e quelli come materiali da costruzione (secondo gli standard ISO, BS, EN). I test combinati di sicurezza antincendio devono essere conformi ai codici di costruzione esistenti in ogni Paese. Possono essere inoltre incluse misure preventive aggiuntive, come interruttori di fiamma sia laterali che verticali, sistemi antincendio attivi e soluzioni di estinzione e spegnimento. Può essere poi ben giustificato imporre dei requisiti più rigorosi per quanto riguarda il rilevamento automatico dei guasti e la gestione di quei sistemi in cui i connettori e le scatole di giunzione non sono facilmente accessibili per l’ispezione e la manutenzione ordinaria.

Di conseguenza, è fondamentale apportare delle modifiche ai test sulla sicurezza al fuoco esistenti per i pannelli FV tradizionali, in modo da adattarli opportunamente ai sistemi BIPV. I test di partenza analizzano quindi differenti aspetti della sicurezza antincendio a livello dei sistemi FV tradizionali ma, quando si vanno a adattare tali prove ai BIPV, bisogna considerare il comportamento dei componenti elettrici installati lungo l’involucro dell’edificio ed affrontare esplicitamente i vari elementi BIPV quando vengono sviluppati standard di sicurezza al fuoco per i vari materiali di facciata.

Type of tested property	Tested property	Property testing level (Module/ System)	BIPV feature to be considered	Recommended tests/procedures (including references to existing ones)
Fire safety	Different aspects of fire safety	System	(Often poorly accessible) electrical components installed within building envelope	For BIPV facades: Address BIPV components explicitly when developing fire safety standards for façade materials

Figura 68 – Tabella esplicativa riguardante i test di sicurezza antincendio.

In seguito ad uno studio del 2013 che ha raccolto circa 180 incidenti dovuti ad incendi o a danni da calore causati da sistemi FV, è risultato che le principali cause di incendio sono errori di installazione e componenti difettosi, principalmente inverter e scatole di derivazione. Questo rapporto conclude che il rischio di incendio è venti volte superiore in caso di sistema BIPV, rispetto che BAPV. Da allora però, tali allarmanti risultati non sono stati né verificati né messi in discussione da studi successivi, il che indica un'urgente necessità di ulteriori ricerche.

I sistemi BIPV presentano indiscutibilmente alcune caratteristiche che aumentano il rischio di incendio, di conseguenza il rischio di incendio per gli impianti FV è evidentemente non trascurabile e deve esser affrontato in modo adeguato, per evitare lesioni a persone e perdite economiche consistenti.

Uno studio condotto nel 2017 mostra tre aspetti principali che possono essere ulteriormente sviluppati e studiati:

- Metodi e procedure di prova;
- Monitoraggio durante le condizioni di funzionamento;
- Chiaro quadro normativo.

In generale, attualmente, i regolamenti edilizi nazionali non presentano requisiti applicabili in modo specifico ai sistemi fotovoltaici integrati in facciata;

bisognerebbe quindi accontentarsi delle normative riguardanti i sistemi FV applicati in copertura come l'UL 1703 americana, con il suo riferimento UL 790, che costituirebbe al momento il metodo di prova esistente più appropriato ad essere adattato ai BIPV, dal momento che si tratta di uno standard che fornisce metodi per testare la combinazione di materiali di copertura, sistemi di montaggio e moduli FV. Questo standard UL è stato recentemente armonizzato con la IEC 61730, ed è stato sostituito dal UL 61730, che è conforme al codice elettrico nazionale degli Stati Uniti. Sembra quindi che l'UL 61730 sia la base per l'ulteriore sviluppo di metodi, standard, requisiti e linee guida volti a valutare le proprietà di comportamento al fuoco e a prevenire i relativi rischi di incendio dell'impianto FV integrato però solo in copertura.

Per quanto riguarda invece le facciate BIPV, le celle solari dovrebbero essere trattate come gli altri materiali esterni di facciata, con uno sguardo al comportamento al fuoco ed al rischio di propagazione delle fiamme all'interno delle cavità nascoste dal rivestimento esteriore. Inoltre, un ulteriore fattore riguardante le celle solari è che, all'interno dell'intercapedine posizionata posteriormente ai moduli FV, vi sono molti collegamenti elettrici, e quindi potenziali fonti di accensione. La sfida qui sta nel fatto che le norme riguardanti la propagazione dell'incendio in facciata sono in fase di sviluppo, e che quindi non è chiaro quali siano i requisiti da imporre ai moduli FV montati verticalmente come rivestimento di facciata.

Il trattamento delle prestazioni di resistenza al fuoco dei sistemi BIPV varia a seconda della regione e del Paese. In studi passati sulla sicurezza antincendio dei BIPV è stato dimostrato che gli strati di vetro e i moduli BIPV hanno le stesse prestazioni, se esposti al fuoco. A tale proposito sono stati fatti diversi esperimenti: uno con un forno scaldante e altri con i moduli FV collegati ad un

dispositivo di carico, al fine di valutare le prestazioni in uso; dal risultato sperimentale di questi ultimi test è emerso che il modulo BIPV testato aveva le stesse proprietà di isolamento alla fiamma di un vetro antincendio convenzionale. Tuttavia, ci sono molte altre configurazioni di moduli BIPV per le quali non si possono trarre le stesse conclusioni.

5.5 Prodotti BIPV

A seconda della funzione, dei materiali utilizzati e delle caratteristiche meccaniche ed elettriche, i prodotti BIPV possono essere classificati in cinque principali categorie:

- Pellicole: I prodotti BIPV in pellicola sono molto leggeri e flessibili, e questo permette una facile installazione ed elimina vincoli di peso sulle coperture degli edifici. Le celle solari FV sono spesso costituite da una sottile pellicola flessibile, in modo da assicurarne la flessibilità e l'efficienza nei confronti di alte temperature, nel caso di soluzioni in coperture non ventilate. Questo tipo di prodotti ha un basso fattore di riempimento, a causa sia dell'efficienza non elevata che dell'alta resistenza delle celle solari in pellicola sottile. Tuttavia, è possibile variare di molto il grado di inclinazione del prodotto fornendo soluzioni flessibili;
- Piastrelle: I prodotti BIPV in piastrelle possono coprire un'intera copertura o parti selezionate di essa; sono di solito sistemate in un modulo solare BIPV con le sembianze di classiche piastrelle, rendendo molto semplice anche l'uso in caso di ristrutturazioni di tetti;
- Moduli: I prodotti BIPV a modulo sono simili ai convenzionali moduli fotovoltaici. La differenza, tuttavia, è che i moduli BIPV sono costituiti da "pelli" che rispondono bene agli agenti atmosferici. L'utilizzo di questi sistemi aumenta la facilità dell'installazione;

- Vetri a celle solari: I prodotti BIPV in vetro a celle solari forniscono una grande varietà di opzioni per finestre, facciate e coperture. Differenti colori, soluzioni trasparenti e semitrasparenti, possono dare risultati molto diversi ma soprattutto esteticamente gradevoli. Questi elementi trasmettono la luce solare e proteggono da acqua e sole. La distanza fra le celle solari dipende dal livello di trasparenza richiesto e dai criteri di produzione di energia, dal momento che lo spazio fra le celle trasmette la luce del sole in modo diffuso. È possibile richiedere prodotti speciali e customizzati, a seconda delle dimensioni, materiali, colori, trasparenza e distanza fra le celle;
- BAPV.

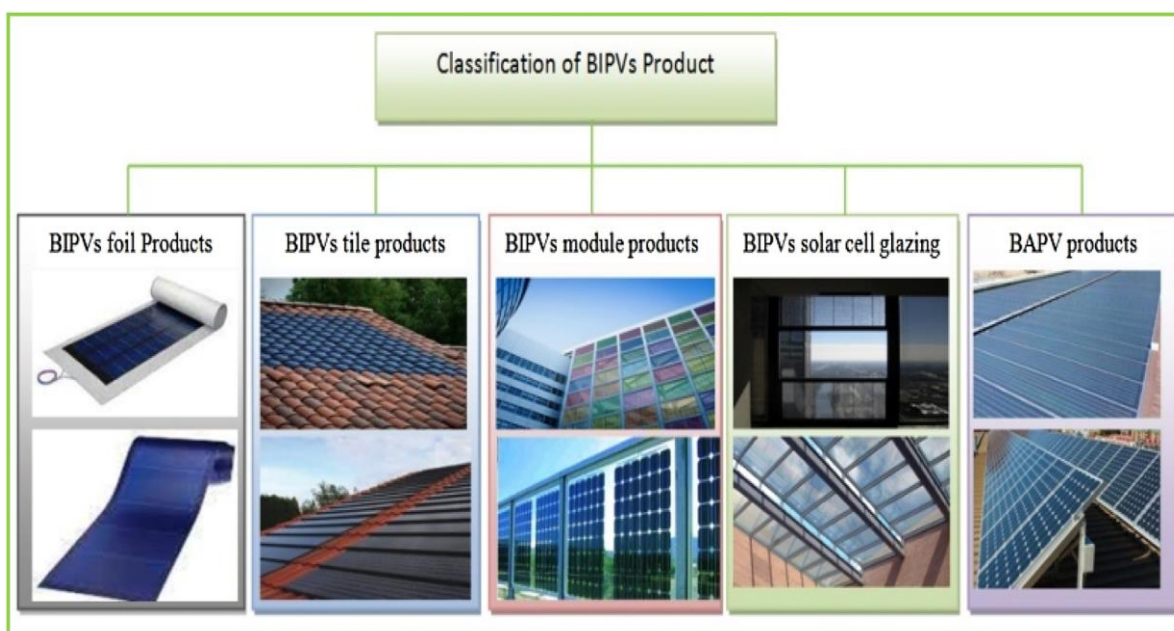


Figura 69 – Diverse tipologie di prodotti BIPV in commercio.

5.6 BIPV sull'involucro degli edifici

Generalmente, per quanto riguarda i sistemi BIPV integrati in facciata, è possibile dividere i moduli FV in due categorie: “contenenti pannelli di vetro” o “non contenenti pannelli di vetro”.

Inoltre, essi vengono suddivisi in:

- Moduli montati verticalmente non accessibili dall'interno dell'edificio: i moduli sono installati sull'involucro dell'edificio con un angolo fra i 75° e i 90° , con una barriera posteriore per prevenire la caduta di grandi pezzi di vetro o delle persone;

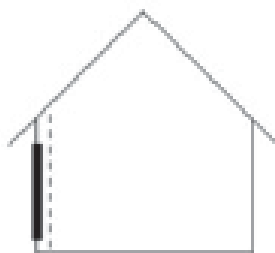


Figura 70 – Modulo FV non accessibile dall'interno dell'edificio.

- Moduli montati verticalmente accessibili dall'interno dell'edificio: tali moduli sono montati sull'involucro con un angolo fra i 75° e i 90° .

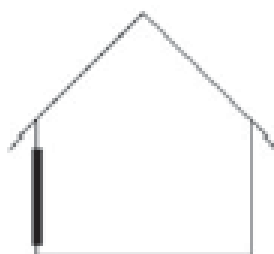


Figura 71 – Modulo FV accessibile dall'interno dell'edificio.

5.6.1 BIPV in facciata ventilata

Volendo integrare sistemi BIPV in facciata ventilata, è utile specificare che, dal punto di vista della generazione fotovoltaica, questa tipologia di facciata presenta il vantaggio di prevedere una intercapedine di aria alle spalle dei moduli FV che aiuta a ridurre la temperatura e, di conseguenza, ne aumenta l'efficienza elettrica. Per non interrompere la ventilazione è però necessario sistemare i pannelli FV in fasce verticali, piuttosto che orizzontalmente.

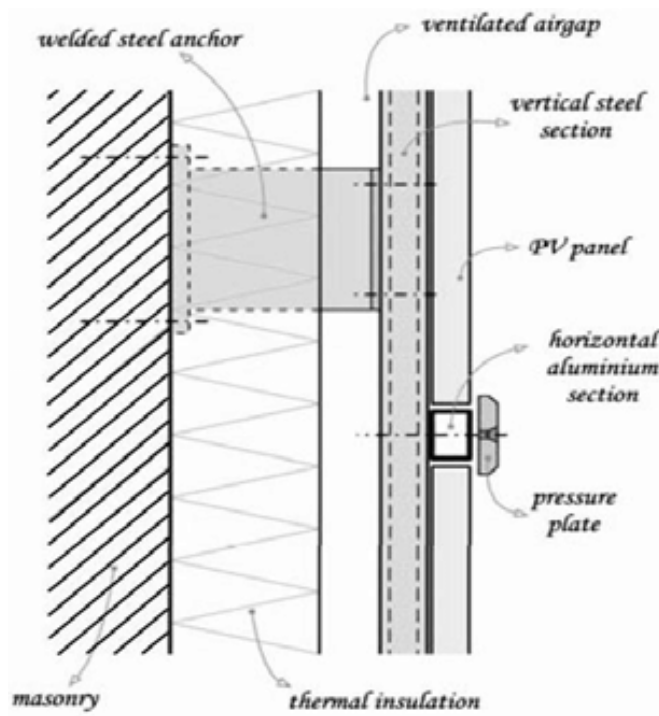


Figura 72 – Dettaglio costruttivo di facciata ventilata BIPV.

Inoltre, la manutenzione e la sostituzione dei moduli fotovoltaici integrati in una facciata ventilata è sempre più semplice, piuttosto che in altri tipi di facciata.

Il tipo di materiali da utilizzare per il rivestimento della facciata ventilata viene definito in base ai moduli FV, cercando di individuare le dimensioni e i toni più simili, e adattando i moduli all'aspetto generale, in modo tale da raggiungere un'integrazione più riuscita possibile.

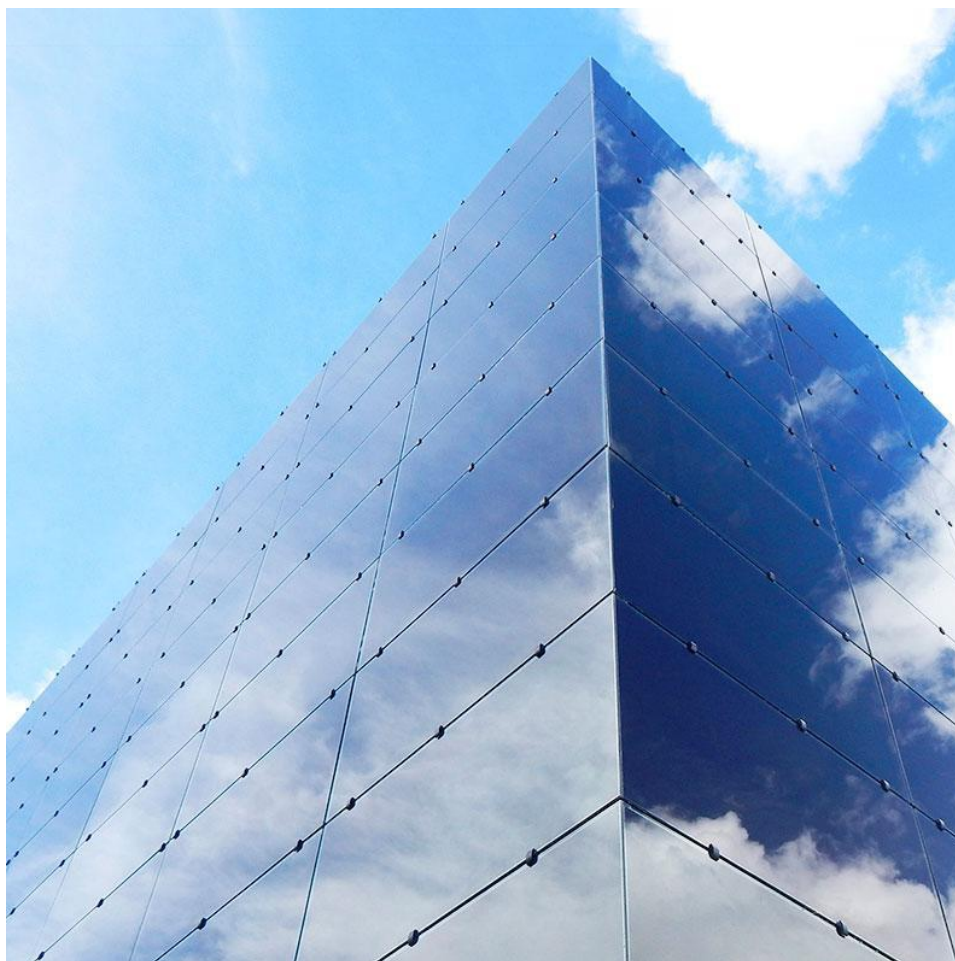


Figura 73 – Caso reale di facciata ventilata con rivestimento costituito da moduli BIPV.

Solitamente, i moduli FV vengono integrati nella parte alta della facciata, in modo da ricevere più irradiazione solare; inoltre, la sottostruttura dei moduli viene fissata in parallelo alla struttura del resto della facciata, al fine di ottenere una buona integrazione fra le due.

L'effetto precedentemente citato dell'aumento dell'efficienza dei moduli FV integrati in facciate ventilate, dipende dalla larghezza dell'intercapedine e dalle condizioni climatiche locali.

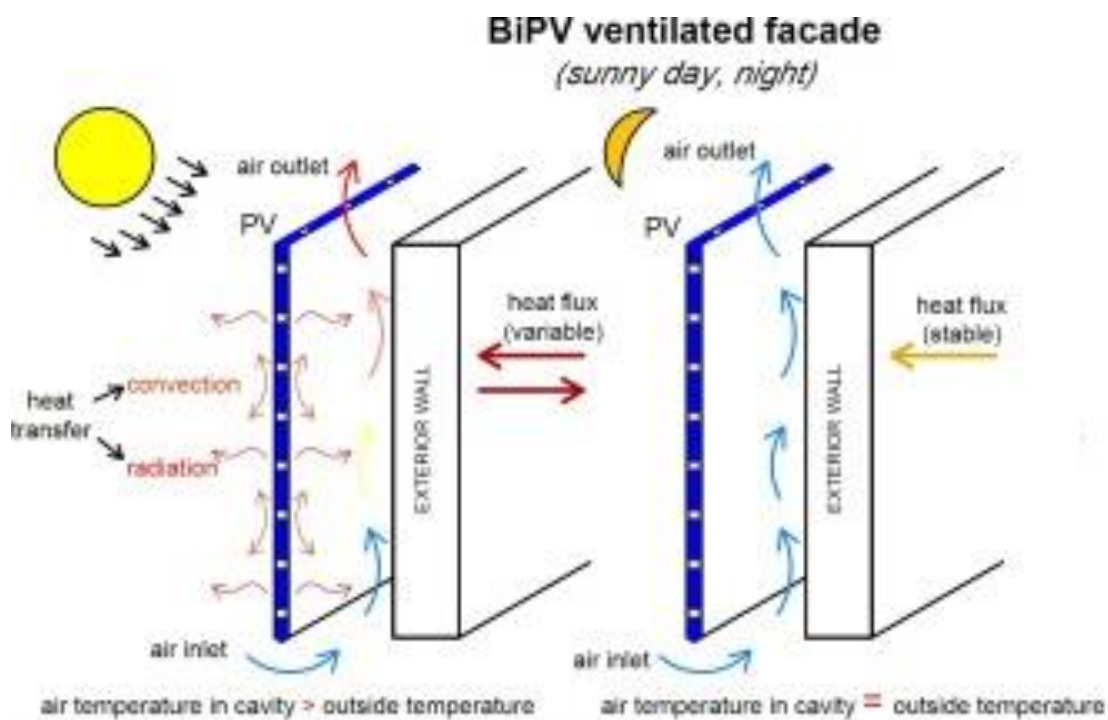


Figura 74 – Funzionamento energetico di una facciata ventilata BiPV.

A tale proposito, uno studio ha determinato che l'aumento dello spessore della camera fino a 22 cm riduce il guadagno di calore attraverso l'involucro, ma quando tale spessore aumenta, si ha un incremento a causa del flusso di calore convettivo laminare. Secondo un altro studio, 60 mm è invece lo spessore adatto della camera posizionata dietro i moduli, in modo da accrescerne l'efficienza e ridurre il carico di raffrescamento in estate e quello di riscaldamento in inverno.

5.6.2 BiPV in facciata trasparente

A titolo informativo, viene anche riportato il caso di sistemi BiPV integrati in facciate continue.

I sistemi di facciate continue sono una tecnologia ben stabilizzata ed utilizzata in numerosi progetti di prestigio. Le zone trasparenti prevedono normalmente un doppio strato di vetro, mentre quelle opache presentano o un vetro opaco o dei pannelli di metallo coibentati. I moduli FV possono essere facilmente incorporati come unità prefabbricate a doppio vetro: il pannello esterno può essere in vetro

laminato su cui viene applicato il vetro FV in resina, mentre quello interno è in vetro. Inoltre, si posiziona un'intercapedine d'aria sigillata fra i due vetri. Lo spessore totale di questo modulo di solito non supera i 30 mm.

5.6.3 "Adaptive Solar Facade": pannelli FV in sistema di oscuramento

Infine, un'ulteriore applicazione di elementi BIPV è quella di integrarli in un sistema di oscuramento dinamico. Questo offre la possibilità di soddisfare due differenti questioni: generare elettricità ed equilibrare la performance energetica, aggiungendo un'espressione architettonica. È importante considerare che la forma dei moduli FV e quella dei pannelli di oscuramento non devono per forza coincidere.

L'elemento base di una ASF ("Adaptive Solar Facade") è il modulo dinamico e multifunzionale che provvede ad oscurare, produrre elettricità e a distribuire la luce durante il giorno. Tale modulo può agire in modo autonomo, ma può anche essere incluso in piccoli gruppi, in cui i vari componenti possono muoversi in modo indipendente gli uni dagli altri.

La ASF può essere architettonicamente riassunta come un elemento di facciata intelligente che può diventare un esempio per l'efficienza energetica, il comfort visivo, la distribuzione della luce e anche per il marchio e l'immagine risultante.

Essa prevede quattro elementi chiave:

- Pannello oscurante, che consiste in una sottostruttura in alluminio che contiene il modulo FV in pellicola sottile;
- Attuatore soft-pneumatico, composto da materiali elastici e contenente tre camere infiammabili; inoltre, è capace di orientare la cella FV lungo due assi;

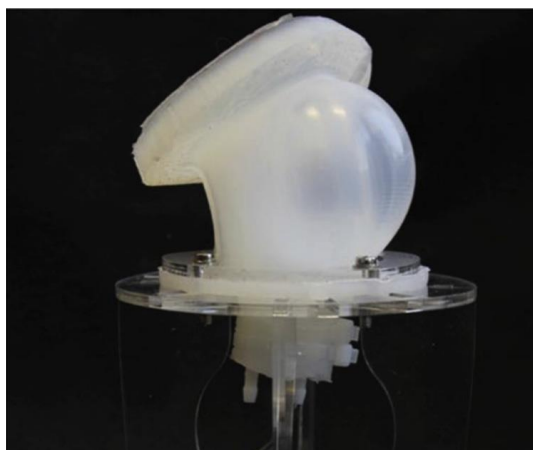


Figura 75 – Attuatore soft-pneumatico.

- Cantilever, che fornisce un offset che permette al pannello FV di ruotare in tutte le direzioni necessarie senza interferire con il telaio e la struttura della rete di cavi.
- Telaio e rete di cavi: quest'ultima, attraversando un telaio in acciaio inossidabile, forma la sottostruttura della ASF.

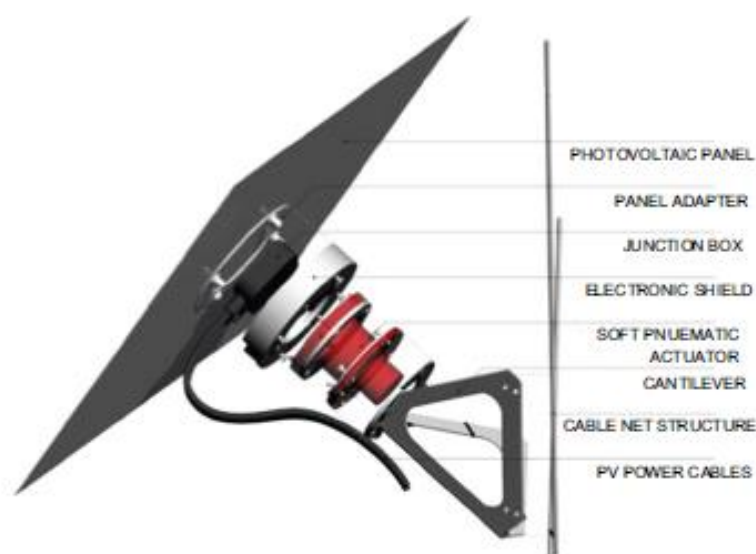


Figura 76 – Componenti che costituiscono un sistema BIPV.

L'obiettivo di una ASF è quindi quello di creare un ambiente confortabile da un punto di vista termico e visivo, soddisfacendo i requisiti dell'utente per quanto riguarda l'oscuramento, la temperatura e i livelli di luce. Allo stesso tempo, le

celle FV generano corrente, sempre che questo non vada in conflitto con i desideri dell'utente.

I pannelli possono esser raggruppati in fasce, e ognuna di esse può presentare un'inclinazione diversa: pannelli in posizione totalmente aperta (90°), totalmente chiusa (0°) o inclinata (45°) rispetto all'asse orizzontale. Rispetto all'asse verticale, tutti i pannelli possono muoversi da 90° a -90° , ruotando di 15° alla volta.

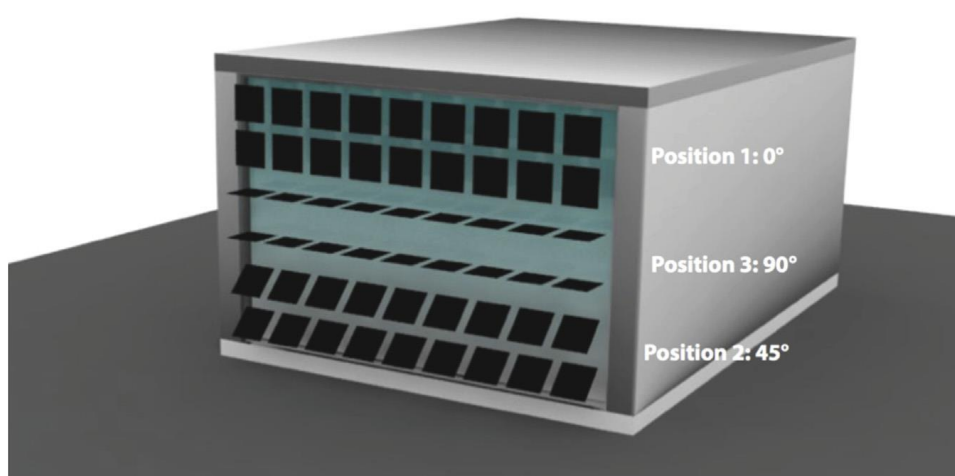


Figura 77 – Integrazione in facciata di pannelli con diverse inclinazioni.

5.7 Comportamento al fuoco dei sistemi BIPV in facciata

Nonostante i convertitori di energia solare fotovoltaica spesso non siano propriamente la causa dell'ignizione, nel caso dello scoppio di un incendio all'interno dell'edificio ospitante, essi parteciperanno alla propagazione del fuoco e scateneranno il meccanismo di diffusione delle fiamme.

Per questo motivo, il requisito generale per tutte le categorie di BIPV in ambito di sicurezza in caso di incendio è, come minimo, la classe di reazione al fuoco E (Europea).

Da un'analisi a riguardo si evince che i requisiti riguardanti la sicurezza di utilizzo e quella in caso di incendio, come anche la stabilità e la resistenza meccanica,

sono rispettati in quasi tutti i casi analizzati; lo stesso vale anche per gli aspetti di igiene e salute, intesa come protezione dagli agenti atmosferici, in grandi percentuali.

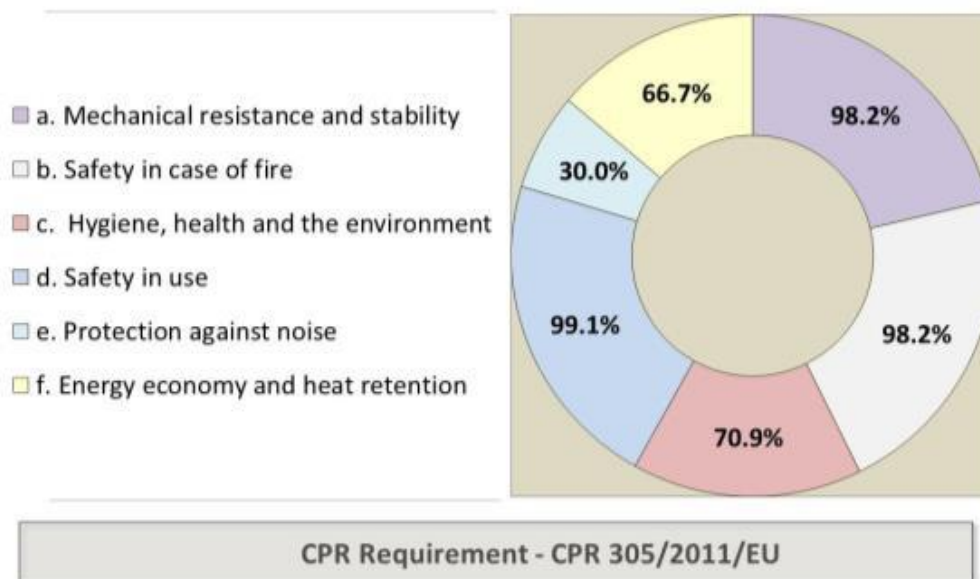


Figura 78 – Grafico riguardante i requisiti relativi ai sistemi BIPV.

In ogni caso, oltre ai già menzionati vantaggi relativi ai sistemi BIPV, gli aspetti correlati alla sicurezza sono molto importanti, in quanto l'integrazione del fotovoltaico negli edifici richiede un'accurata valutazione delle prestazioni in conformità con le norme di costruzione e gli standard fotovoltaici.

Ciò è diventato evidente quando, a seguito della diffusione del fotovoltaico sul mercato, si è registrato anche un aumento dei casi di incendio, evidenziando la necessità di attuare una corretta politica di prevenzione degli incendi che comprende anche i vari sistemi di protezione, soprattutto nei casi di interazione del fotovoltaico con la "pelle" dell'edificio.

In figura seguente viene riportato il numero di incendi registrati sul territorio italiano in caso di presenza di sistemi fotovoltaici, dal 2002 al 2015, che ha richiesto l'intervento di squadre di soccorso.

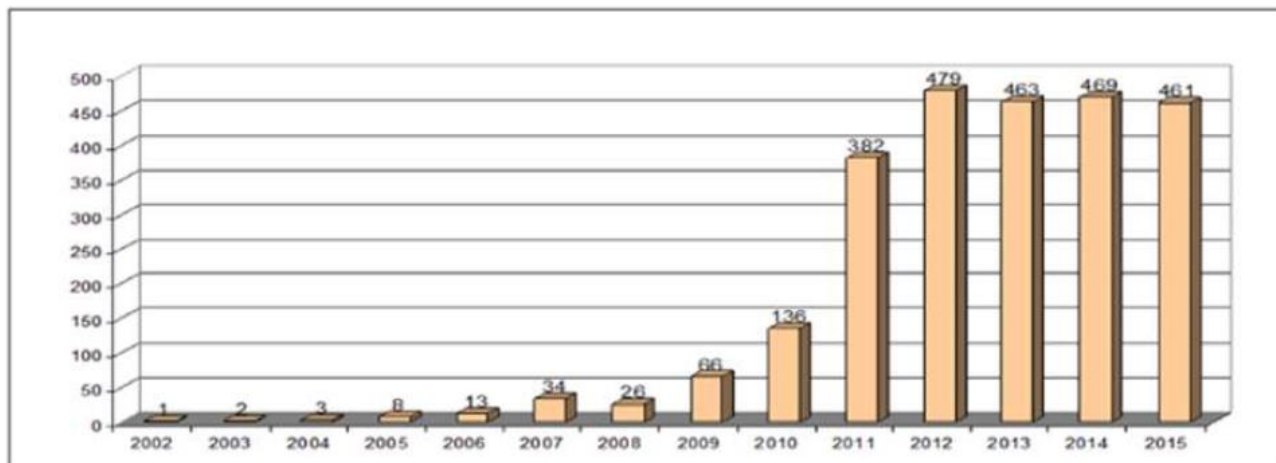


Figura 79 – Casi di incendio registrati in Italia in presenza di impianti FV.

A differenza dei moduli standard semplicemente posizionati sull'edificio, tutti i tipi di moduli BIPV vengono integrati rappresentando loro stessi parti dell'edificio. Devono quindi soddisfare tutti i requisiti dei prodotti da costruzione e le regole riguardanti i moduli BIPV, che sono quindi differenti rispetto al caso di moduli FV tradizionali. In particolare, dovranno rispettare i requisiti per la sicurezza antincendio degli edifici in base al loro posizionamento ed utilizzo.

La "fire safety" è quindi un tema di primario interesse per i sistemi BIPV, ed ha come scopo quello di garantire un adeguato livello di sicurezza e affidabilità durante il ciclo di vita dell'edificio che, a sua volta, espone la necessità di studiare tecnologie ed approcci innovativi per proteggere gli edifici, come ad esempio i sistemi di rapido spegnimento.

Bisogna inoltre considerare, come già anticipato, due aspetti fondamentali:

- Sotto radiazione solare, i moduli BIPV rimangono attivi;
- I prodotti BIPV, una volta colpiti dalla luce del sole, generano tensione e corrente.

Lo sviluppo di dedicate procedure di test per qualificare i vari prodotti BIPV al fine della sicurezza antincendio dovrà tenere conto di queste fondamentali

caratteristiche, che generalmente non sono considerate nelle norme e nelle specifiche esistenti riguardanti i prodotti da costruzione non attivi.

Inoltre, deve essere garantito non solo che l'impianto fotovoltaico non sia causa di innesco, ma anche che, in caso di presenza di fiamme, l'incendio non si propaghi.

5.7.1 Facciate BIPV dotate di sistemi RSS

Contestualmente al recente aumento dei sistemi BIPV, sono stati sviluppati dispositivi che hanno la funzione di interrompere l'alimentazione in situazione di emergenza e di garantire la sicurezza in caso di incendio, chiamati Sistemi di Spegnimento Rapido (RSS – "Rapid shutdown systems").

Si tratta, in questo caso, di facciate dotate di sistemi in grado di minimizzare rapidamente il potenziale elettrico, al fine di garantire principalmente la sicurezza durante la manutenzione e, in caso di incendio, la sicurezza del personale di soccorso, nonché la riduzione della propagazione dell'incendio.

Come già detto, i moduli FV, in assenza di carico elettrico e ad inverter spento, rimangono attivi in presenza di irraggiamento solare, e sono quindi in grado di generare tensioni pericolose per gli occupanti dell'edificio e per il personale delle squadre di manutenzione e soccorso. Lo scopo di un RSS è quindi quello di operare partizioni programmate sui circuiti elettrici in modo che la tensione generata sia inferiore al valore pericoloso per la folgorazione, in caso di guasto o emergenza.

Considerando che i prodotti e gli impianti BIPV costituiscono parte integrante dell'edificio, è fondamentale che venga garantita l'affidabilità di tali sistemi, sia nell'impedire l'accensione dell'incendio quando la causa è legata ad un malfunzionamento dell'impianto fotovoltaico, che nel caso di protezione da

folgorazione, nella situazione in cui la facciata sia interessata da fiamme generate da un incendio proveniente da una fonte esterna o dal fotovoltaico stesso. Infatti, in molti casi risulta difficile definire la causa che ha provocato un incendio dell'impianto fotovoltaico in un edificio.

Va inoltre considerato che allo stato attuale non esistono procedure specifiche per la valutazione del corretto funzionamento e dell'affidabilità dei sistemi di estinzione rapida, e non vi è un'unificazione a livello europeo ed internazionale riguardo il loro utilizzo. A seconda del paese, infatti, l'installazione di dispositivi RSS può essere consentito o meno, con regole differenti.

Ad esempio, in Italia sono state rilasciate nel 2012 due linee guida per la valutazione del rischio di incendio dovuto all'installazione di un impianto fotovoltaico in un edificio dove sono collocate attività sottoposte ad ispezione antincendio. Tali linee guida sono principalmente orientate sulla performance, fornendo anche alcune disposizioni "ritenute soddisfacenti", che potrebbero essere sempre sostituite facendo una specifica valutazione del rischio dell'impianto fotovoltaico considerato.

Sistemi di spegnimento rapido (RSS)

Nello specifico, i sistemi RSS sono stati introdotti per la prima volta nel 2014 negli Stati Uniti mediante il National Electrical Code, al fine di garantire le condizioni di sicurezza in un sistema fotovoltaico durante una situazione di emergenza come, ma non solo, un incendio. Sono stati progettati per ridurre la tensione pericolosa in corrente continua DC, dal momento che i dispositivi attualmente esistenti non garantiscono un rapido ed efficace sistema di frazionamento, sia in caso di emergenza che in caso di manutenzione, e per aumentare la sicurezza in presenza di impianti fotovoltaici. Il principio di questi sistemi è quello di agire ed

interrompere lo stesso circuito in più parti, a livello dei moduli stessi, per portare il livello di tensione tra i moduli ad un valore non pericoloso.

Quindi, fondamentalmente, un sistema RSS viene definito come un sistema in grado di spegnere l'impianto in un tempo di intervento ragionevolmente rapido, solitamente attorno ai 30 secondi; il passo successivo per questi sistemi è poi quello di andare a sezionare l'impianto FV, in modo tale da non avere più corrente e quindi da fermare il carico, ma continuando ad avere una tensione di sicurezza circolante fra i capi.

I sistemi RSS si dividono, in primo luogo, in due tipologie: i sistemi base e i sistemi attivi. I primi sono quelli che intervengono per spegnere l'impianto mediante un inverter; questi sistemi non sono però propriamente evoluti per quanto riguarda il sezionamento e la messa in sicurezza dell'impianto, dal momento che l'unica azione che compiono consiste nel togliere il carico elettrico, interrompendo quindi il passaggio di corrente, ma mantenendo tensione e differenza di potenziale ai capi dei vari componenti dell'impianto FV. Poi, nel tempo, sono nati i sistemi RSS attivi, che invece vanno a sezionare tutte le specifiche parti dell'impianto, in modo tale da ottenere un livello di tensione non pericolosa, vale a dire inferiore ai 120 V in corrente continua. È però da considerare che, a seconda della dimensione del modulo che costituisce l'impianto, si hanno dei valori differenti di tensione, di conseguenza i sistemi possono agire su ogni singolo modulo o su blocchi di moduli contemporaneamente, in modo tale che non si superi mai la tensione limite.

Il sistema RSS, quindi, spesso funge da secondo interruttore, se ne è già presente uno che interrompe l'impianto; in questo caso, il RSS viene utilizzato per suddividere in vari sistemi separati l'intera facciata. Questo perché, in caso di incendio, vi è il rischio che si consumi l'isolante dei circuiti elettrici e dei cavi, e

questo andrebbe a causare una folgorazione per contatto indiretto. A questo punto, se l'impianto è stato fermato non si ha più il carico ma, avendo perso l'isolamento, collegando una massa metallica con il terreno si va a ricreare il carico. Di conseguenza, il principio è quello di sezionare tutto l'impianto, in modo tale che non sia più composto da n moduli in facciata, bensì che sia costituito da n piccoli impianti da due moduli ciascuno, con una tensione sempre inferiore ai 120 V.

Il componente principale del RSS deve normalmente essere posizionato sul retro dei moduli fotovoltaici e convenzionalmente si tratta di un dispositivo di dimensioni paragonabili alle scatole di derivazione FV, con la funzione di separare tra loro i moduli per ottenere tensioni in corrente continua non pericolose.

Questi sistemi sono nati per intervenire su impianti esistenti, oltre che su quelli nuovi, senza modificarne i componenti ma aggiungendo solamente il sistema di spegnimento rapido ed il relativo circuito.

In generale, esistono diverse tipologie di sistemi RSS: si passa da quelli molto semplici che consistono in un pulsante che l'utente preme in caso di necessità e viene fermato l'impianto, a sistemi più complicati che gestiscono i dati.

Attualmente sono stati sviluppati vari tipi di tali sistemi, con diverse metodologie di funzionamento: alcuni interrompono e dividono il circuito con un segnale radio, anziché via cavo dal pulsante incaricato, altri dispositivi, oltre all'intervento manuale, sono dotati di termocoppie in grado di rilevare anomalie termiche. Alcuni sistemi più complessi svolgono la funzione di ottimizzatori e di rapido spegnimento, altri, leggendo da uno specifico toroide, sono in grado, oltre ad eseguire il rapido spegnimento, anche di prevenire l'insorgenza di archi elettrici in corrente continua.

Inoltre, alcuni sistemi presentano un funzionamento elettronico e vengono posizionati sulle scatole di giunzione affinché leggano i valori di tensione e corrente e, in caso di problemi, staccano l'impianto all'altezza della scatola; ci sono infine sistemi pneumatici, azionabili sotto carico, che vanno ad aprire e chiudere l'impianto mediante getti di aria compressa e che, di conseguenza, necessitano di una manutenzione di più importante entità.

È inoltre possibile combinare diverse tipologie di funzionamento: ad esempio, in un sistema possono coesistere un pulsante di sgancio, come un telecomando ad onde radio o un pulsante fisico da premere in situazione di emergenza, e dei dispositivi più o meno efficaci che vanno ad analizzare parametri diversi.

Per quanto riguarda il funzionamento di sistemi che prevedono l'inserimento di sensori di temperatura, ad esempio, vengono posizionate queste sonde che, quando leggono un valore più alto rispetto a quello impostato al di sopra del quale il silicio inizia a degradarsi, vanno ad azionare l'apertura dell'impianto. Il punto cruciale consiste nel capire dove posizionare questi sensori affinché agiscano correttamente, dal momento che non si può sapere perfettamente la provenienza delle fiamme e la direzione della propagazione dell'incendio, né tanto meno qual è la temperatura reale; inoltre, a differenza dei pannelli FV tradizionali, i moduli BIPV vetro-vetro integrati in facciata presentano appunto questo materiale isolante che non permette la trasmissione del calore trasversalmente dalla superficie posteriore a quella anteriore e viceversa: di conseguenza, se da una parte si è a contatto con le fiamme, allo stesso tempo dall'altra si potrebbe misurare una temperatura ancora piuttosto limitata. Per questo bisogna prestare attenzione alla specificità dei materiali utilizzati, in correlazione al sistema RSS da scegliere, senza poter individuare un sistema considerato come il migliore in generale.

Ad oggi, gli RSS sono sistemi aggiuntivi che vengono installati ed utilizzati senza far riferimento ad una specifica delibera e senza essere presi come riferimento da un organo ufficiale. Inoltre, tali sistemi sono nati in favore di sicurezza, e ci sono alcuni Paesi, come gli Stati Uniti e il Canada, che ne consigliano l'uso, e altri che non li prendono in considerazione dal momento che non vi è propriamente uno studio a riguardo e neanche dati scientifici che ne possano dimostrare l'affidabilità.

I principali argomenti di discussione ed incertezza riguardano il fatto che i sistemi RSS non presentano un isolamento galvanico che assicuri la separazione e la protezione e, di conseguenza, non si sa se venga effettivamente garantita continuità o meno quando il sistema elettronico viene colpito a sua volta da un incendio o nel caso in cui sia soggetto ad alte temperature e si degradi; inoltre, un'altra questione riguarda le elevate temperature generate dallo sviluppo di un incendio, che sono anche in grado di distruggere i moduli in silicio in corrispondenza di una sola porzione dell'impianto e, a quel punto, ci sarebbe bisogno di creare un collegamento con la restante porzione, ma non vi è una direttiva univoca a riguardo: infatti, vengono ad esempio utilizzati sistemi via cavo, sistemi wireless ad onde radio, ecc.

Considerata la varietà di dispositivi, le diverse tipologie di funzionamento, e la mancanza di una regolamentazione unificata a livello europeo ed internazionale, è necessario effettuare programmi di ricerca per validarne il funzionamento e l'uso, e specificare i protocolli di test in modo tale da garantire la sicurezza degli edifici.

Scenari di test

Con l'obiettivo di definire spunti utili per nuovi protocolli di test, partendo dalle regole riguardanti i prodotti da costruzione, si è cercato di riprodurre il

comportamento reale di una facciata con sistema FV integrato, sotto irraggiamento solare e presenza di carico elettrico, che presenta dispositivi RSS.

È opportuno però ricordare che i test eseguiti per i moduli FV tradizionali consistono nella propagazione della fiamma lineare, e sono diversi rispetto a quelli che vengono fatti sui moduli BIPV, per i quali è invece fondamentale utilizzare un approccio semiprobabilistico, quindi basato sulle reali situazioni di necessità.

Sono stati considerati, a tale scopo, i seguenti aspetti fondamentali:

- La facilità, per i laboratori, di allestimento ed esecuzione del test;
- Il contenimento dei costi e delle tempistiche per consentire la diffusione del protocollo di test;
- La ripetibilità dei test necessari per il confronto e l'analisi dei risultati, e anche per la valutazione delle prestazioni dei RSS;
- La conformità alle normative vigenti dei requisiti di sicurezza antincendio dei componenti/prodotti da costruzione;
- L'esecuzione del test in condizioni di generazione elettrica connessa all'intervento dei dispositivi.

Di seguito sono riportate le scelte effettuate per lo sviluppo dei protocolli necessari per lo svolgimento dei test:

➤ Area dei test e componenti BIPV

L'area dei test viene definita come la porzione di facciata comprendente diversi sistemi di fissaggio ed un numero rilevante di moduli attivi collegati fra loro per creare una parte significativa di facciata BIPV. Viene quindi eseguita la modellazione della facciata e di tutti i componenti e prodotti da costruzione utilizzati, dal momento che il comportamento sia della facciata che dei sistemi

RSS potrebbe fornire risultati differenti a seconda del tipo di costruzione. Per questo, vengono replicati non solo i componenti FV ma anche tutti i materiali ed il tipo di sistema costruttivo, compresi gli specifici elementi di fissaggio. Un altro aspetto da considerare è quello di definire il numero di dispositivi RSS da inserire in relazione al numero di prodotti BIPV utilizzati.

In questi test, è stato possibile verificare il comportamento di una singola serie di moduli FV collegati fra loro, la cosiddetta stringa, oppure valutarne il comportamento quando la porzione di facciata si trova nella situazione in cui sono presenti due stringhe separate e adiacenti. In questo secondo caso, è possibile verificare il comportamento in caso di emergenza di dispositivi associati a stringhe differenti.



Figura 80 – Test effettuati su porzioni di facciata ricreate mediante moduli FV.

➤ Test indoor e outdoor

Il test outdoor permette di riprodurre le reali condizioni di irraggiamento, ventilazione e di temperatura, ma è suscettibile di estrema variabilità e difficoltà

nelle esecuzioni ripetute. Infatti, durante l'esecuzione dei test all'aperto, la tensione ed i livelli di corrente sono fortemente influenzati dalle condizioni di irraggiamento esterno. In caso di cielo nuvoloso, avendo a disposizione una porzione ridotta di facciata, il livello di tensione e corrente potrebbe non essere congruente con i valori nominali e di reale funzionamento, considerando anche il ridotto numero di moduli per la modellazione della porzione di facciata. Infine, bisogna considerare che la produzione di fumi in una esecuzione all'esterno viene rilasciata in atmosfera senza possibilità di controllarli.

Il test indoor, invece, consente lo sviluppo di un protocollo che garantisce le condizioni di ripetibilità. Considerando che le prove devono essere conformi ai requisiti dei prodotti da costruzione, il test in ambiente interno, con una porzione ridotta di facciata, potrebbe essere eseguito in una camera Single Burning Item (SBI). Il recupero dei fumi, in questo caso, sarebbe semplice e potrebbe anche essere controllato e valutato, evitando la variabilità data dalle condizioni di irraggiamento e da altre condizioni ambientali, come la velocità del vento. Nell'esecuzione indoor però, non essendoci un valore effettivo di irraggiamento, è necessario predisporre procedure per l'esecuzione di test che possano garantire i valori di tensione e corrente imposti dal protocollo come ausilio a specifiche lampade o alimentatori esterni.

➤ Livello di tensione e corrente

Sia nel caso di test outdoor che indoor, lo scopo è quello di valutare il comportamento al fuoco di una facciata fotovoltaica e il corretto funzionamento del sistema RSS. Poiché nelle condizioni di test, con un numero ridotto di moduli in serie, il valore di tensione è inferiore a quello nominale medio di una stringa collegata ad un inverter, l'esecuzione del test indoor potrebbe richiedere una tensione imposta dall'esterno. Come anticipato, tale valore potrebbe attenersi

al valore medio di una stringa collegata ad un inverter (tra 500 e 800 V), al fine di valutare il comportamento del sistema durante la rapida disconnessione dell'impianto elettrico. La stessa valutazione è da effettuarsi per il valore della corrente circolante nei moduli: con uno scarso livello di irraggiamento, il valore della corrente circolante nella stringa sottoposta al test potrebbe essere relativamente basso rispetto al valore che si genererebbe in condizioni di irraggiamento superiori a 800 W/m². Inoltre, considerando che il sistema RSS deve agire nel tempo con correnti continue, e tenendo in conto la possibilità di confrontare e replicare il test, è importante definire il circuito elettrico necessario per ottenere il protocollo di test rispetto ai valori imposti di tensione e corrente.

➤ Bruciatori

Per l'esecuzione dei test, ci si orienta su due scenari specifici differenti: il primo è principalmente legato ad un incendio che investe i moduli fotovoltaici, utilizzando un bruciatore lineare; il secondo è simile ad un "evento scatenante (trigger)" che potrebbe provocare un incendio colpendo direttamente il RSS situato in prossimità dei moduli BIPV. Questi due scenari non devono essere considerati test alternativi, bensì testati individualmente e simultaneamente.

Test outdoor e risultati

Viene qui riportato il caso di test in condizioni esterne, in modo da sfruttare l'irraggiamento naturale ed una maggiore semplicità e praticità costruttiva. Nonostante l'irraggiamento naturale, per evitare le variabilità legate alle condizioni climatiche esterne, si è deciso di utilizzare un circuito elettrico che garantisca livelli fissi di tensione e corrente. Per semplicità, la velocità del vento e la sua direzione non sono state analizzate nello svolgimento del test.

La modellazione iniziale della facciata è stata eseguita con moduli BIPV a grandezza naturale, utilizzando quattro unità disposte su due file di due colonne verticali. I campioni BIPV sono stati poi collegati con appositi fissaggi, senza posizionare isolamento, muro o altri materiali da costruzione dietro di essi, lasciando quindi la parte posteriore direttamente a contatto con l'aria.

Di seguito si riportano le caratteristiche della porzione di facciata:

- Dimensioni della porzione di facciata: 6 m²;
- Dimensioni di ogni modulo: 1,5 m²;
- Tipo di modulo BIPV: vetro-vetro;
- Backsheet: vetro;
- Trattamenti termici del vetro: temperato frontalmente e durezza posteriore.

Sono stati utilizzati quattro moduli FV con vetro satinato colorato per nascondere le celle, normalmente utilizzati per la realizzazione di facciate BIPV. Il collegamento di tali moduli è stato realizzato in serie per formare un'unica stringa FV. IL circuito elettrico collegato garantisce un livello di tensione dei moduli di 5 V ciascuno, in modo tale da fornire una tensione di stringa totale pari a 20 V. La serie di moduli viene quindi attraversata, sotto carico elettrico, da una corrente di funzionamento pari ad 1 A, impostata esternamente fornendo il valore di tensione rilevato. Inoltre, sono stati installati due sistemi RSS, il primo collegato ai due moduli superiori ed il secondo per il controllo degli altri due moduli FV inferiori.

Nella parte posteriore della porzione di facciata sono state inserite sei termocoppie, al fine di comprendere l'andamento ed il comportamento della temperatura durante il test.

I dispositivi utilizzati durante il test funzionano tramite un telecomando che deve essere attivato da un operatore, mentre sono dotati di un solo sensore per la misura della temperatura che interrompe la tensione/corrente all'interno dei moduli FV ad esso collegati. Quando tali sonde misurano una temperatura superiore a 85 ° C, avviene l'intervento del dispositivo RSS.

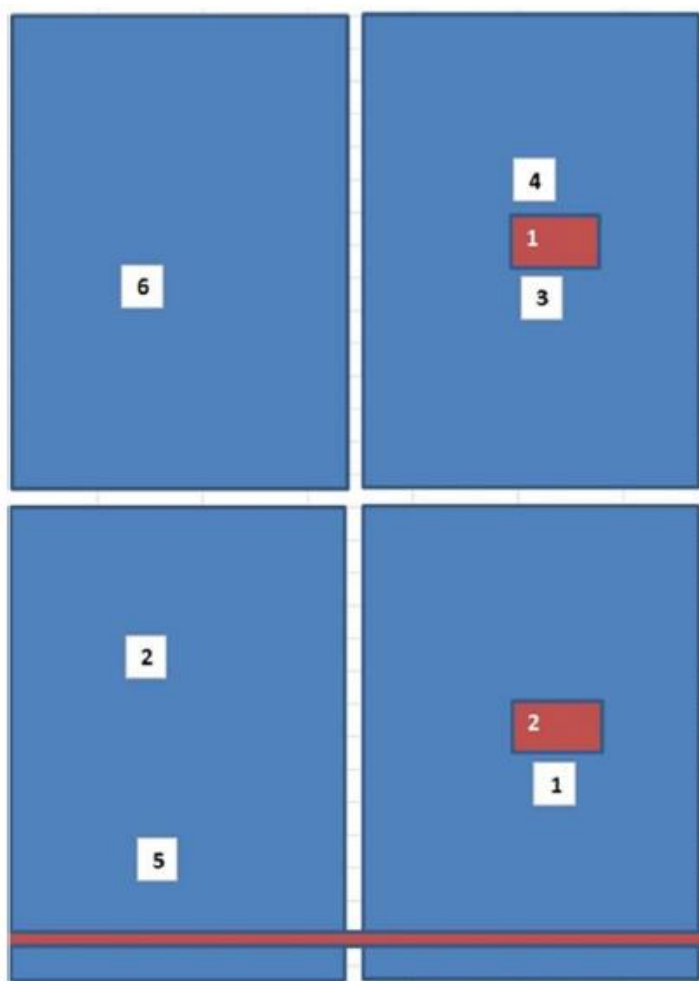


Figura 81 – Schema della porzione di facciata da testare.

In bianco le sei termocoppie e in rosso i due RSS applicati sul backsheet dei moduli FV. Ogni RSS è connesso a due moduli FV, mentre tre termocoppie vengono utilizzate per ogni coppia di moduli superiori e inferiori, ma in modo speculare.

Il test inizia con una corrente imposta di 1 A ed una tensione di stringa pari a 20 V. Il bruciatore lineare da 30 kW viene posizionato in prossimità della base dei due moduli FV inferiori. Al variare del livello di tensione viene mantenuta costante la corrente di 1 A. Dopo 10 minuti la fiamma inizia a distruggere i moduli FV inferiori in prossimità della linea del bruciatore, raggiungendo il collasso finale dopo 11 minuti. Grazie al fatto che i moduli inferiori non abbiano propagato le fiamme, i due moduli superiori non sono mai stati colpiti direttamente dalle fiamme e, di conseguenza, non hanno mostrato un significativo aumento della temperatura o della variazione di tensione.

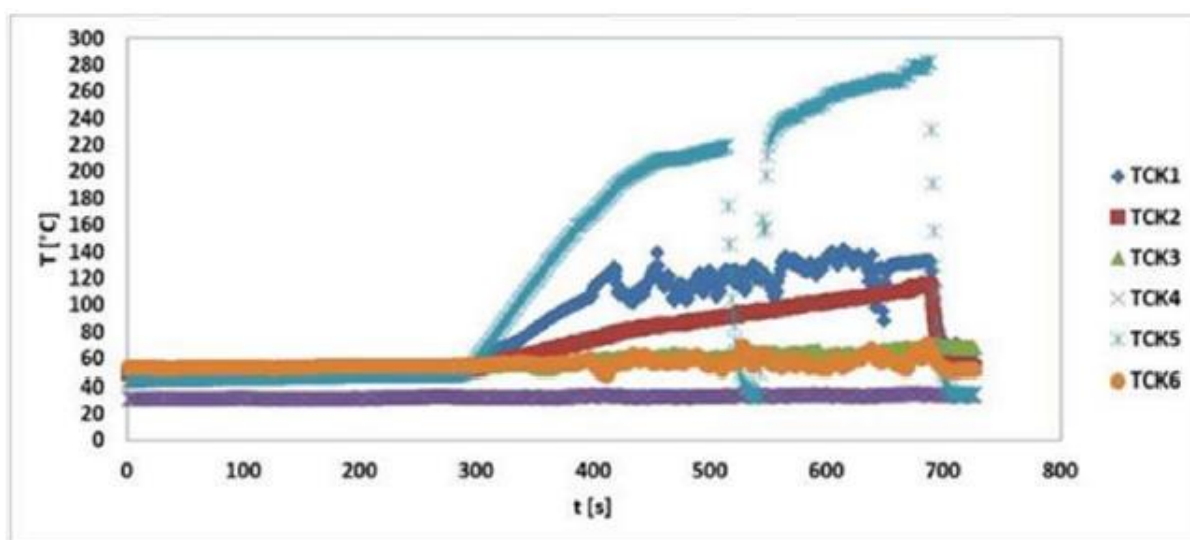


Figura 82 - Temperature misurate in prossimità del backsheet dei moduli.

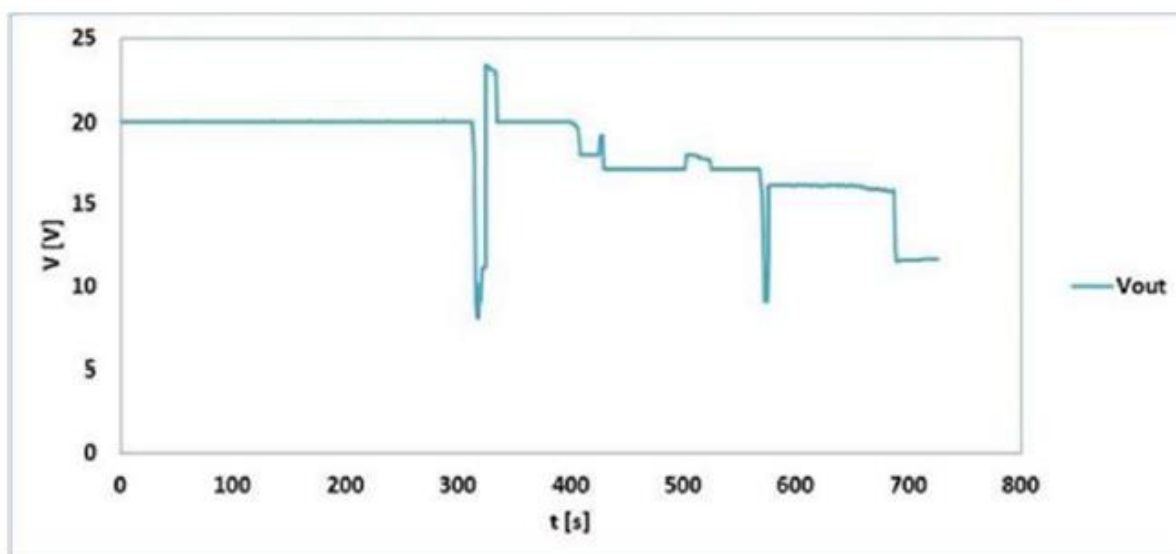


Figura 83 - Potenziale elettrico (tensione) misurato fra i morsetti esterni dei moduli FV.

I due sistemi RSS, così come sono stati previsti, non partecipano quindi alla prevenzione e allo spegnimento automatico fino a quando non viene premuto manualmente l'apposito interruttore che fornisce il segnale.

Il posizionamento dei sistemi RSS rispetto ai moduli FV è un fattore che potrebbe determinare variazioni sulla riuscita del test. Occorre infatti considerare che in seguito alla presenza della fiamma, l'elevata temperatura raggiunta porta a deformazioni del materiale costituente il modulo BIPV.

In caso di deformazioni, l'adesione tra il sistema RSS ed il modulo BIPV può collassare fino al verificarsi di un distacco.

Per quanto riguarda i valori di corrente e tensione circolante, per poter effettuare i test in condizioni indoor, si prevede di effettuare tali prove con valori paragonabili a quelli circolanti nelle stringhe collegate agli inverter in casi reali. Questa possibilità deve essere compatibile con la necessità di irradiazione artificiale piuttosto che con la creazione di un circuito esterno che possa comunque garantire il corretto funzionamento del modulo BIPV e del sistema RSS ad esso collegato.

Infine, dovrebbero essere valutate le diverse possibilità di test a singola stringa, piuttosto che la configurazione con stringhe separate ma adiacenti. In questo caso sarà possibile valutare se il sistema in esame può intervenire in caso di emergenza in entrambe le stringhe con differenti temperature e differenti valori di corrente e tensione.

5.7.2 Facciate BIPV a doppia pelle

Nel caso specifico di test e analisi del comportamento al fuoco di facciate BIPV a doppia pelle, si osserva che, a seguito di un incendio, i pannelli posizionati più in basso vengono completamente bruciati, con annessa distorsione dei telai in

alluminio e addirittura lo scioglimento di alcune parti. L'altezza delle fiamme ovviamente aumenta nel caso in cui siano presenti i pannelli FV nell'intercapedine, piuttosto che quando non vi sono. La stessa cosa accade con la temperatura dei gas generati dal fuoco, la quale è molto più alta quando i pannelli sono installati nella camera. Infine, circa a 900 °C si verifica il distacco del vetro che ricopre i pannelli.

Di conseguenza, si può dire che l'accensione dei pannelli FV all'interno dell'intercapedine provoca l'aumento dell'area della regione con le temperature più alte e aggrava il pericolo di incendio. Inoltre, i prodotti incandescenti generati dall'incendio non rimangono confinati nelle vicinanze, ma si diffondono lungo tutta l'intercapedine.

6. Valutazione del rischio di incendio

A questo punto, è fondamentale descrivere accuratamente in cosa consiste il procedimento di valutazione dei rischi e, nello specifico, del rischio di incendio, e di come questo venga influenzato da diversi parametri, come lo scenario di incendio e la tipologia di sistema costruttivo di facciata, e “aggravato” dalla presenza di un impianto fotovoltaico.

6.1 Premessa

La valutazione dei rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori è il primo e più importante adempimento da assolvere per conoscere qualunque tipo di rischio presente in una determinata attività e giungere alla successiva individuazione delle misure di prevenzione e protezione e di programmazione temporale delle stesse.

La valutazione dei rischi non si basa su un algoritmo, ma è un processo conoscitivo complesso, pieno di incertezze, per cui in genere difficilmente si giunge a risultati identici da parte di più “valutatori” diversi. La convergenza, il consenso su una certa valutazione di rischio, più che dalla precisione dei calcoli, dipende dalla trasparenza del processo e dei metodi che l’hanno generato.

La metodologia generale in cui si colloca la valutazione è tipica di ogni analisi di rischio, in cui il valore del rischio di un evento temuto è una funzione matematica f , che dipende direttamente sia dalla probabilità di accadimento dell’evento che dalle sue probabili conseguenze, del tipo:

$$R = f(P, M, p, k)$$

Dove:

- R: rischio associato ad un evento;

- P: probabilità che si verifichi tale evento;
- M: magnitudo (entità del danno) che assume al verificarsi dell'evento;
- p: probabilità della presenza dell'uomo al verificarsi dell'evento;
- k: formazione ed informazione delle persone esposte al rischio.

I primi tre parametri si possono assumere come direttamente proporzionali al livello di rischio: maggiori sono la probabilità di accadimento, la magnitudo e la presenza dell'uomo, maggiore è l'entità del rischio.

Il quarto parametro k è invece inversamente proporzionale al livello di rischio, ovvero maggiore è l'informazione e la formazione specifica delle persone, minore sarà la probabilità che si verifichi l'evento e l'entità del danno.

Pertanto, l'espressione matematica del rischio può essere semplificata nella seguente:

$$R = P \times M \times \frac{p}{k}$$

Generalmente tale formula viene ulteriormente semplificata nella seguente espressione, in cui viene inglobato il parametro p nella probabilità P di accadimento dell'evento dannoso, e il parametro k sia in P che in M:

$$R = P \times M$$

Nel piano, questa espressione viene rappresentata dalla curva del rischio di seguito riportata:

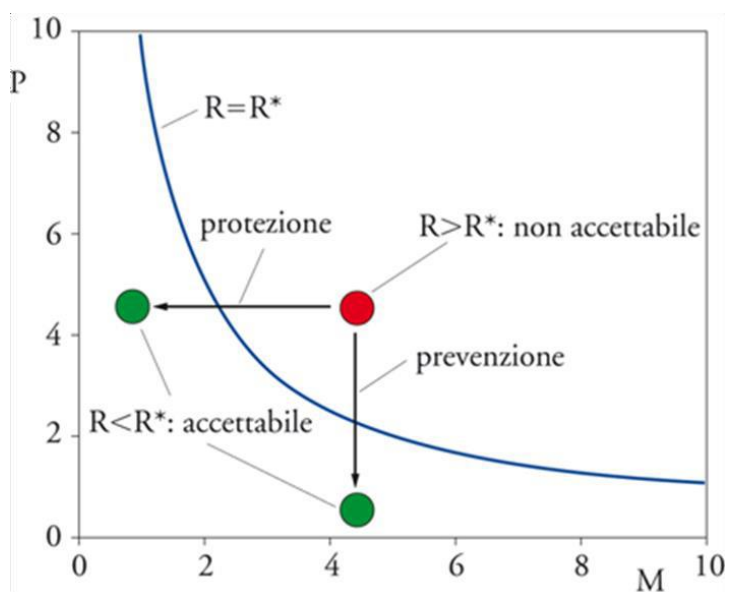


Figura 84 – Rappresentazione della curva del rischio.

La riduzione del rischio può avvenire mediante l'adozione di misure di prevenzione atte a ridurre la probabilità del verificarsi dell'evento atteso o di misure di protezione che puntano alla mitigazione delle eventuali conseguenze, o di una combinazione di entrambe.

La decisione riguardante la tipologia di intervento, che sia dell'uno o dell'altro tipo, necessita di stabilire prima quale sia il livello di rischio accettabile R^* , in base al quale verranno giudicate bisognose di intervento in via prioritaria tutte quelle situazioni che presentano un livello di rischio R tale che:

$$R > R^*$$

La metodologia di tipo quantitativo sin qui esposta ha il pregio dell'oggettività statistica ed è legata soprattutto alla disponibilità dei dati storici degli eventi e alla loro significatività; è pertanto limitata a ristretti settori, generalmente quelli a rischio di incidente rilevante o quelli dove l'affidabilità dei processi è l'elemento discriminante (nucleare, aeronautica, chimica, ecc.). Occorre tenere ben

presente, d'altro canto, che le stesse linee guida contenute negli orientamenti CEE consigliano di riservare solamente ad "alcuni problemi complessi" l'adozione di "un modello matematico di valutazione dei rischi quale ausilio in sede decisionale", come tale "riservato agli specialisti", mentre "nella grande maggioranza dei posti di lavoro, l'espressione matematica di ciò che può essere considerato un rischio accettabile è sostituita dalla messa in atto di un modello di buona pratica corrente".

L'approccio metodologico usato nella valutazione dei rischi può quindi essere di tipo qualitativo o semiquantitativo, e basarsi sull'interpretazione "soggettiva" della probabilità, ovvero sul "grado di fiducia" che una persona assegna al verificarsi di un evento ed alla entità delle sue conseguenze.

Il termine "soggettivo", basato sul grado di fiducia, non deve in questo caso essere considerato come arbitrario, ma come "giudizio esperto", legato al grado di conoscenza e di competenza sui molteplici fattori che intervengono e compongono il sistema oggetto di analisi.

Si può quindi concludere che studi correttamente impostati che mettono in luce l'aspetto qualitativo, possono offrire risultati migliori rispetto a studi quantitativi che utilizzano tecniche puntuali.

6.2 Il rischio di incendio

L'incendio, ai fini della valutazione dei rischi, può essere considerato un evento complesso in cui convergono molteplici aspetti: chimici, strutturali, impiantistici, funzionali, architettonici, urbanistici, psicologici, ecc., nonché quelli legati all'organizzazione del lavoro e agli aspetti economici.

Il rischio incendio di una determinata attività risulta funzione di una serie di parametri:

- La combustibilità dei materiali presenti, la loro facilità di accensione e velocità di combustione;
- Il carico d'incendio, che esprime il potere calorifico globale di tutti i materiali combustibili in rapporto alle superfici su cui essi poggiano;
- La propagazione dell'incendio attraverso corridoi, canali dell'impianto di condizionamento, gabbie delle scale, vani degli ascensori, colonne di scarico, colonne montanti della rete elettrica;
- La distruttibilità e riproducibilità dei beni;
- La presenza di persone.

6.3 Analisi del rischio di incendio

L'analisi del rischio individua appunto i rischi connessi ad una data attività civile o industriale e, in particolare, relativamente agli incendi:

- Identifica gli incidenti ipotizzabili in un impianto o complesso di impianti (incendio, esplosione, rilascio di fluidi pericolosi, ecc.);
- Stima la probabilità che gli eventi rischiosi si verifichino, quindi identifica gli eventi ragionevolmente prevedibili e contro i quali occorre apportare delle difese attive e passive;
- Stima le conseguenze associate alle ipotesi di incidente e quindi l'ampiezza delle aree circostanti interessate dagli effetti, anche al fine del dimensionamento dei Piani di Emergenza Interni e/o Esterni;
- Procede alla valutazione del rischio, inteso come processo di confronto con gli obiettivi di sicurezza, al fine di stabilire l'accettabilità delle ipotesi incidentali relativamente all'ambiente interessato;

- Permette di determinare le azioni che possono essere intraprese per intervenire sui fattori che determinano il rischio, per diminuire le frequenze di accadimento dell'incidente e le conseguenze associate.

6.4 La valutazione del rischio di incendio

La valutazione probabilistica del rischio passa generalmente attraverso tre fasi:

- Individuazione degli eventi potenzialmente pericolosi, che possono, cioè, dar luogo ad un incidente;
- Stima della probabilità che un determinato evento si verifichi;
- Valutazione delle relative conseguenze.

Nel settore antincendio, il Decreto Interministeriale 10 marzo 1998 "Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro", riguardante la valutazione dei rischi di incendio, illustra una procedura semplificata, ma non per questo meno efficace, per procedere alla valutazione del rischio incendio di un'attività.

La valutazione del rischio incendio proposta dal D.M. 10 marzo 1998 passa attraverso le seguenti fasi:

1. Individuazione degli eventi potenzialmente pericolosi, che possono, cioè, dar luogo ad un incendio, come ad esempio sostanze facilmente combustibili ed infiammabili, sorgenti di innesco, impianti elettrici, situazioni che possono determinare la facile propagazione dell'incendio, ecc.;
2. Individuazione dei lavoratori e di altre persone presenti nel luogo di lavoro esposte a rischi di incendio, come presenza di pubblico occasionale, persone con ridotta capacità motoria e sensoriale, persone che non hanno familiarità dei luoghi e delle vie di esodo, ecc.;

3. Eliminazione o riduzione dei pericoli di incendio, sostituendo ad esempio sostanze pericolose con altre meno o affatto pericolose;
4. Classificazione del livello di rischio presente;
5. Adeguatezza delle misure di sicurezza, tramite verifica del raggiungimento degli obiettivi, e scelta e adozione delle misure compensative;
6. Redazione della valutazione dei rischi di incendio, contenente le conclusioni;
7. Revisione della valutazione dei rischi di incendio, in relazione alla variazione dei fattori di rischio individuati.

Il Decreto Interministeriale 10 marzo 1998 classifica poi il livello di rischio incendio, valutato in conformità ai criteri di cui all'Allegato I, in tre categorie:

- Rischio elevato;
- Rischio medio;
- Rischio basso.

I criteri enunciati da tale Decreto Interministeriale sono ancora validi se si parla di edifici civili in generale, non solo per edifici civili e industriali che costituiscono luogo di lavoro.

In generale, per quanto riguarda la probabilità che l'incendio si verifichi si può dire che:

- edifici più grandi hanno un maggior rischio di incendio, in quanto vi sono più potenziali fonti di innesco;
- la probabilità di avere un grande incendio è legata al carico d'incendio, quindi ai materiali da costruzione utilizzati, e alle misure di sicurezza antincendio in grado di contenere lo sviluppo dell'incendio.

Come anche per quanto riguarda il rischio di incendio associato alle facciate degli edifici, l'analisi quantitativa non è adeguata, in quanto è possibile solo se si dispone di dati statistici, ma non vi sono dati che collegano tutte le variabili che influiscono sul rischio di incendio in un sistema di facciata combustibile.

Negli ultimi 20 anni ci sono stati numerosi casi di incendio che forniscono prove di come si sono diffusi gli incendi e di come hanno reagito le disposizioni sulla sicurezza antincendio, ma l'influenza effettiva di ogni disposizione sulla sicurezza antincendio non può essere quantificata in modo preciso.

Di conseguenza, i quattro metodi di valutazione del rischio di incendio meglio documentati sono:

- US Fire Safety Evaluation System (FSES);
- Swiss Gretener method;
- UK Edinburgh scheme (una continuazione del Fire Safety Evaluation System);
- FRAME, Fire Risk Assessment Method (for) Engineering;

Il FSES è un metodo di punteggio per lo sviluppo di equivalenze al NFPA 101 Life Safety Code. Il modello di FSES, come l'Edinburgh scheme, si basa su un punteggio e sulla classificazione delle variabili del rischio. I punteggi dipendono da giudizi di ingegneria collettivi integrati nella metodologia e raccolti utilizzando il metodo Delphi. Questi metodi sono utili per conoscere le variabili che devono essere valutate, ma la ponderazione o la classificazione delle variabili non possono che mantenere un certo grado di incertezza. Ad esempio, il sistema di rilevamento di un incendio all'interno dell'edificio, nel caso di un incendio di facciata, potrebbe non rilevare il fuoco se questo non si è verificato all'interno dell'edificio.

Il metodo Swiss Gretener fornisce parametri associati ai rischi (come le sorgenti di ignizione) e alle misure di protezione (ad esempio gli sprinkler), attraverso valori numerici derivati empiricamente. Il prodotto di questi valori fornisce una misura del potenziale pericolo e delle misure protettive. Si ha quindi una misura del rischio atteso.

Il metodo FRAME si basa su formule matematiche di rischio potenziale (R), accettazione e livello di protezione. Il metodo consente la valutazione dei rischi sia per situazioni esistenti, sia per modificazioni di queste, sia per edifici e strutture di nuova realizzazione; in questo ultimo caso, la misura del rischio di incendio dovrebbe essere un parametro monitorato sin dalle fasi incipienti della concezione dell'edificio, da parte dei progettisti, e risulta utile, e a volte necessario, in considerazione della complessità del manufatto edilizio o della sua prevista destinazione d'uso, conoscere quali sono le alternative di protezione antincendio che possono essere considerate equivalenti. Il metodo FRAME esprime attraverso valori numerici le risultanze della valutazione, ovvero il livello di rischio per proprietà, occupanti e contenuto. Utilizzando rapporti di "causa-effetto" e probabilità di successo o insuccesso, FRAME è fondato su di una serie di reti di eventi, ma, anziché basarsi su di un numero dato di gerarchie di eventi, esso si basa sui tre scenari definibili come "casi peggiori"; tutti gli altri scenari vengono statisticamente inclusi in qualità di "casi peggiori" parziali. Tale metodo è stato sviluppato per gli scenari di incendio di un compartimento all'interno di un edificio, ed è relativamente facile da usare dal momento che la teoria che sta dietro non affronta un incendio che si diffonde su più piani di un edificio attraverso il sistema di facciata. L'autore descrive il metodo come segue: "con il metodo FRAME si può calcolare il rischio di incendio negli edifici, per la vita degli occupanti, per i beni e per l'attività in esso svolta. Viene fornita una valutazione

sistematica di tutti i principali fattori di influenza e il risultato finale è un insieme di valori numerici”.

Gli approcci qualitativi definiscono quindi il rischio e le conseguenze basandosi sul giudizio ingegneristico; gli input per una valutazione qualitativa del rischio sono in genere:

- Identificazione dei locali e delle persone a rischio;
- Identificazione del rischio di incendio;
- Valutazione delle probabilità di incendio;
- Valutazione delle conseguenze dell'incendio.

Un esempio di questo tipo di approccio è il PAS 79, adottato nel Regno Unito, che definisce nove fasi per una valutazione qualitativa del rischio. L'Annex B del PAS 79 propone una classifica dei rischi in ordine crescente: limitato, tollerabile, moderato, sostanziale e intollerabile, in cui il rischio è funzione della probabilità d'incendio e delle conseguenze; nello stesso Annex viene anche suggerita una matrice per combinare questi due parametri per determinare il livello di rischio.

Allo stesso modo, il National Health Service (NHS) del Regno Unito propone una matrice di rischio (5x5) per valutare la sicurezza antincendio negli ospedali.

6.4.1 Il metodo semi-quantitativo

Si analizza ora il metodo qualitativo o semi-quantitativo, o come denominato da taluni “operativo”, che consente facilmente di ottenere risultati rapidi utilizzando dati già in possesso.

Il tipo di metodo semplificato adottato, che consente di rispondere a tutte le esigenze sopra esposte, è quello che fa uso di un documento che contiene “liste di controllo”. In tale documento viene individuato un certo numero di fattori potenziali di rischio, ciascuno dei quali viene analizzato impiegando una specifica

lista di controllo, che consente, mediante una serie di domande, di esaminarne i vari aspetti che hanno una rilevanza ai fini della sicurezza e della salute delle persone ed al contempo di esprimere un giudizio sulla gravità del rischio evidenziato, fornendo indirettamente indicazioni sulle modalità di riduzione e/o eliminazione delle cause di rischio.

È evidente che la scelta delle liste di controllo da applicare viene a raffigurare un'operazione estremamente delicata del processo di valutazione del rischio adottato, in quanto costituisce la fase di identificazione dei fattori potenziali di rischio relativi all'ambiente considerato.

Per ogni fattore di rischio si effettua una valutazione per stabilire se il rischio ad esso associato è o meno accettabile e, nel secondo caso, si procede ad una sua riduzione adottando i criteri di eliminazione, riduzione, sostituzione, separazione e protezione.

La stima del rischio incendio viene effettuata tenendo conto di:

- probabilità di accadimento;
- entità del danno.

Il processo di stima porta alla individuazione dei seguenti valori possibili per ciascuno dei parametri dei quali il rischio è funzione:

SCALA PROBABILITÀ (P)	PARAMETRO	SCALA MAGNITUDO (M)
Bassissima	1	Trascurabile
Poco probabile	2	Modesta
Probabile	3	Notevole
Elevata	4	Ingente

Figura 85 – Valori delle scale di probabilità e magnitudo.

Un criterio di stima del rischio incendio completo deve necessariamente prevedere, non solo la quantificazione della probabilità del verificarsi dell'evento che può comportare danno e delle conseguenze del danno stesso, ma anche una sorta di probabilità di essere coinvolti dal verificarsi dell'evento.

La dimensione del danno assume genericamente un aspetto intensivo (magnitudo).

Fissata la scala delle probabilità di accadimento (P) e la scala dei danni possibili (M), il livello di rischio verrà definito dal prodotto:

$$R_{i,j} = M_i \times P_j$$

Questa operazione può essere fatta mediante l'uso di matrici come di seguito presentato.

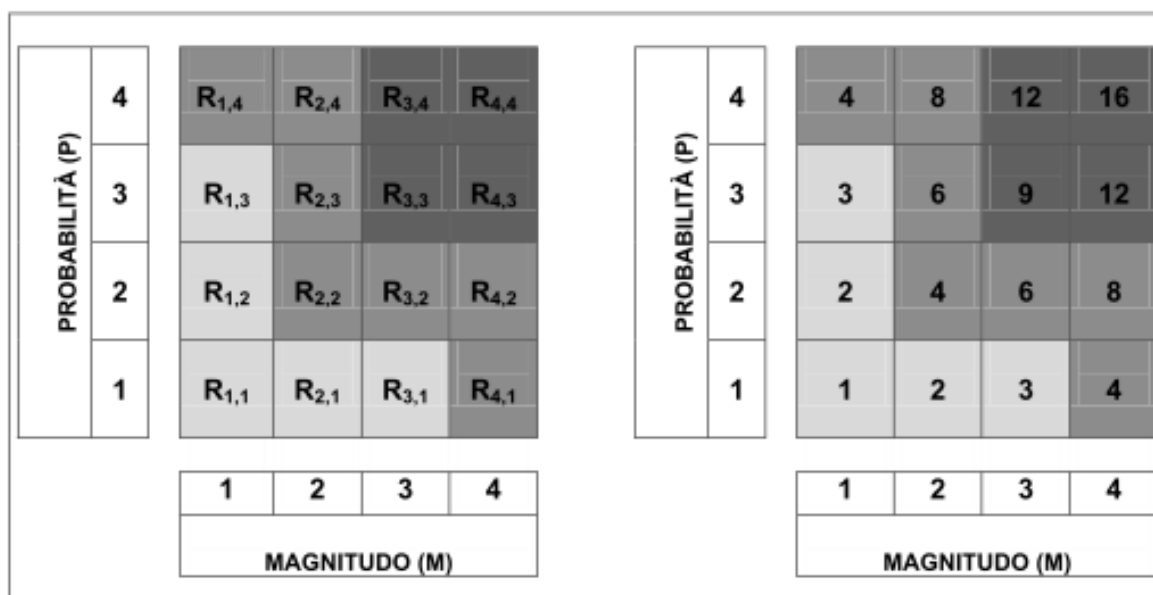


Figura 86 – Matrici probabilità – magnitudo.

Infine, il livello di rischio R può essere assegnato sulla base del valore ottenuto, come esemplificato nella tabella seguente che divide il rischio in tre livelli:

LIVELLO DEL RISCHIO (R) DI OGNI SINGOLO ELEMENTO	
$R > 8$	elevato
$4 \leq R \leq 8$	medio
$1 \leq R \leq 3$	basso

Figura 87 – Livelli di rischio.

Concludendo, in generale la valutazione del rischio è ritenuta di fondamentale importanza in quanto consente, tra l'altro, di eliminare i rischi residui assegnando la giusta priorità di intervento a seconda della gravità.

6.5 Parametri influenti sul rischio di incendio

I parametri che incidono sul rischio di incendio di una facciata possono essere definiti analizzando gli scenari di incendio, come ad esempio il caso in cui si ipotizza un incendio sviluppatosi all'interno dell'edificio che investe la facciata fuoriuscendo tramite le aperture.

Per questo motivo, risulta di fondamentale importanza conoscere:

- Il rischio con il quale l'incendio si può sviluppare all'interno dell'edificio, sia in termini di probabilità che in termini di entità del danno. Questa parte di analisi può fare riferimento ai principi codificati nel Codice di Prevenzione Incendi;
- Le caratteristiche di combustibilità nelle zone critiche del sistema di facciata, al fine di definire la probabilità che l'incendio ha di propagarsi lungo la facciata e di causare, di conseguenza, danni molto maggiori rispetto a quanto avverrebbe se la facciata non fosse combustibile;

- Il comportamento dei diversi sistemi di facciata ventilata, una volta investiti dalla fiamma tipica che si avrebbe nello scenario individuato.

6.5.1 Analisi degli scenari di incendio di una facciata

La probabilità che l'incendio possa raggiungere la facciata può essere stimata attraverso una analisi degli scenari, che vengono individuati, come già visto, in maniera piuttosto concorde, dalle varie linee guida internazionali analizzate.

In particolare, i tre macro-scenari normalmente adottati sono:

- Incendio all'interno dell'edificio, che va ad interessare la facciata fuoriuscendo dalle aperture presenti;
- Incendio all'esterno (alla base o su un balcone) che interessa la facciata;
- Incendio di un edificio adiacente o vicino, che interessa la facciata dell'edificio in questione.

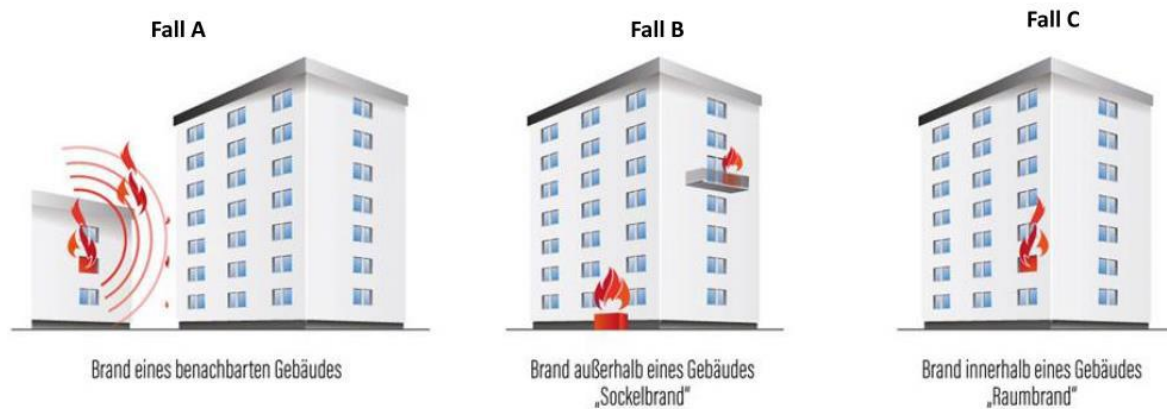


Figura 88 – Tre scenari di incendio più tipici.

Questo raggruppamento di scenari è però convenzionale, quindi potrebbe non coprire tutti gli scenari rilevanti per i vari progetti; ad esempio, quando si parla di facciate ventilate, che quindi presentano intercapedini con rispettivo carico di incendio, è necessario considerare lo scenario di incendio all'interno dell'intercapedine.

Potrebbe inoltre essere utile dividere lo scenario di incendio esterno tra piano terra e spazi esterni in quota, quali ad esempio i balconi, vista la diversità delle fonti di ignizione ipotizzabili: ad esempio, la facciata del piano terra potrebbe essere innescata da un veicolo incendiato o da un atto vandalico, cosa che non si può dire per gli spazi esterni in quota.

Incendio all'interno dell'edificio

La facciata può essere coinvolta da un incendio che, originatosi all'interno di un compartimento, fuoriesce tramite le finestre aperte, o rompendo le specchiature a seguito del flashover. Le cause di tale incendio possono essere le più svariate.

Le misure per ridurre il rischio di incendio all'interno dell'edificio possono essere individuate facendo riferimento ai principi generali della prevenzione incendi. Tali misure, utili al fine di ridurre le probabilità che la facciata possa essere interessata dall'incendio, possono consistere in prescrizioni circa la classe di reazione al fuoco delle porzioni di facciata circostanti le aperture, la previsione di fasce tagliafuoco tra i piani e la prosecuzione del sistema di compartimentazione interno anche in facciata. Vale la pena precisare che per facciata si intende sia il sistema di facciata ventilata, sia il complesso degli elementi dei serramenti (telai, tende, persiane, tapparelle, frangisole, ecc.). Parametri fondamentali da tenere in considerazione sono poi la distanza in verticale tra le aperture e la presenza o meno di balconi, con intradosso combustibile, in grado di contenere l'altezza della fiamma proveniente dall'apertura sottostante.

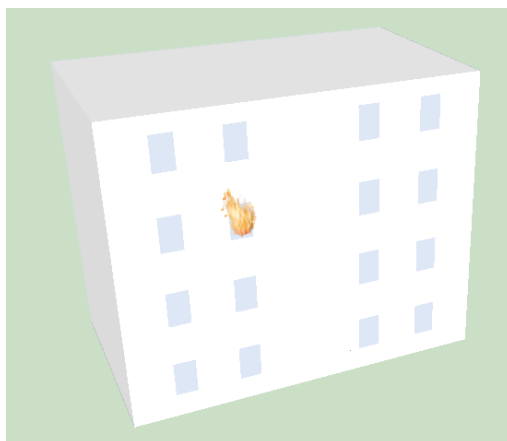


Figura 89 - Incendio in un appartamento che raggiunge la facciata dalla finestra e può estendersi ad altri appartamenti.

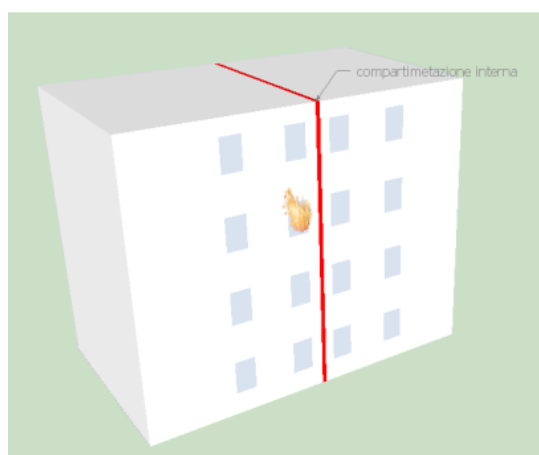


Figura 90 - Incendio in un compartimento che raggiunge la facciata dalla finestra e può estendersi ad un altro compartimento adiacente attraverso la facciata.

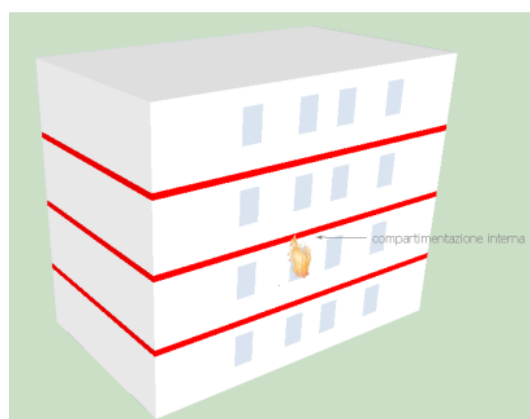


Figura 91 - Incendio in un compartimento che raggiunge la facciata dalla finestra e può estendersi ad un altro piano, che costituisce altro compartimento antincendio, attraverso la facciata.



Figura 92 - Incendio in un appartamento che raggiunge la facciata dalla finestra e può estendersi alla copertura.

Incendio all'esterno

La facciata può essere coinvolta da un incendio che si sviluppa all'esterno dell'edificio, in quota o alla base di esso.

Per quanto riguarda l'incendio in uno spazio in quota praticabile, le fonti di innesco potrebbero essere dovute alla disattenzione degli occupanti (come mozziconi di sigarette, candele, ecc.), oppure, in copertura, potrebbero essere dovute, ad esempio, alla disattenzione di un operatore che posa una guaina impermeabilizzante a fiamma, oppure ad un impianto fotovoltaico, o ancora ad una canna fumaria.

Nel caso invece di un incendio alla base, è possibile che esso si verifichi a causa di un veicolo in fiamme, o di cassonetti dell'immondizia in fiamme, o per atto vandalico. È bene tenere presente che, nel caso di isolante combustibile in facciata, il miglioramento della reazione al fuoco di tale materiale è dato dalla rasatura, che spesso, alla base dell'edificio, potrebbe essere rovinata a causa della maggiore esposizione agli urti.

Le misure per evitare la propagazione possono essere ancora di tipo tecnico, realizzando ad esempio porzioni di facciata incombustibili, ma potrebbero essere

adottate in aggiunta delle misure gestionali. Queste ultime potrebbero consistere nel divieto di accumulare rifiuti o altri materiali combustibili sui balconi, nel divieto di fumare sui balconi degli edifici pubblici, nell'impedire di parcheggiare veicoli in prossimità dell'edificio, ecc.

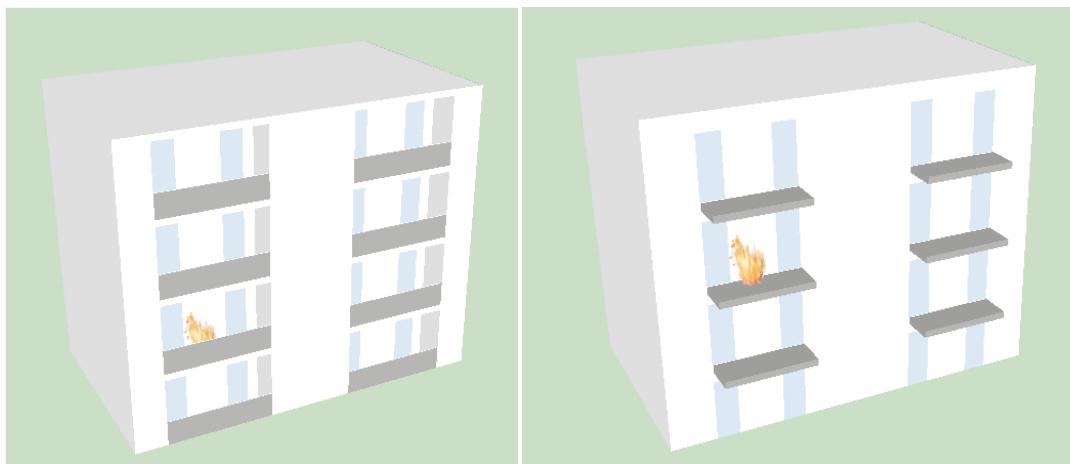


Figura 93 - Incendio su terrazzo/balcone.

Incendio causato da un edificio adiacente o vicino

Un edificio non isolato deve inoltre tenere in considerazione il rischio di incendio esistente da e verso edifici adiacenti o vicini. In questo caso la facciata potrebbe presentare un innesco per irraggiamento o per combustione diretta nel caso in cui le facciate siano contigue.

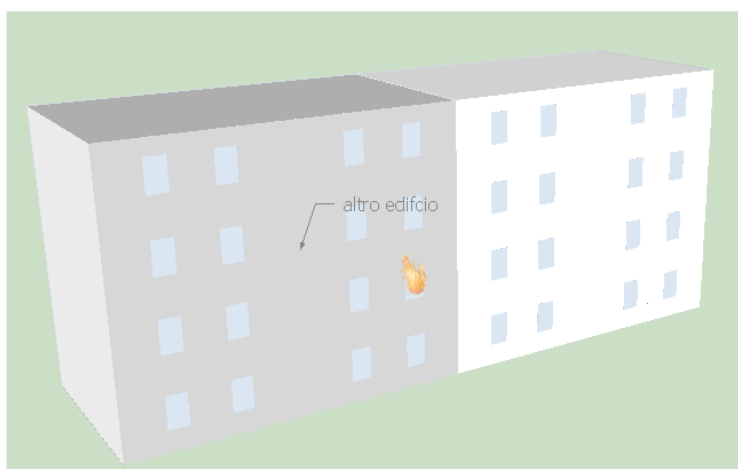


Figura 94 - Incendio all'interno dell'edificio adiacente che fuoriesce da un'apertura e interessa la facciata combustibile dell'edificio in questione.

6.5.2 Analisi dei principi generali di prevenzione incendi

La determinazione del livello di rischio incendio di un edificio può essere raggiunta facendo riferimento ai principi della Fire Safety Engineering, così come per quanto concerne la determinazione della magnitudo.

Il Codice di Prevenzione Incendi (D.M. 3 agosto 2015) individua delle macroclassi di variabili:

- Attività svolta nell'edificio;
- Caratteristiche geometriche dell'edificio;
- Caratteristiche di reazione al fuoco e di resistenza al fuoco;
- Sistema di compartimentazione;
- Sistema di esodo;
- Gestione della sicurezza antincendio;
- Controllo dell'incendio;
- Sistema di rivelazione ed allarme;
- Controllo di fumi e calore;
- Operatività antincendio;
- Sicurezza degli impianti tecnologici e di servizio.

Al fine di identificare e descrivere il rischio di incendio dell'attività, nel Codice di Prevenzione Incendi, come già detto, si definiscono tre tipologie di rischi: R_{vita} , R_{beni} ed $R_{ambiente}$. Il profilo di rischio R_{vita} è attribuito a ciascun compartimento dell'attività, mentre i profili di rischio R_{beni} ed $R_{ambiente}$ sono attribuiti all'intera attività.

Il profilo di rischio R_{vita} è assegnato per compartimento in relazione ai seguenti fattori:

- δ_{occ} : caratteristiche prevalenti degli occupanti che si trovano nel compartimento antincendio;
- t_{α} : velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio.

Caratteristiche prevalenti degli occupanti δ_{occ}		Esempi
A	Gli occupanti sono in stato di veglia ed hanno familiarità con l'edificio	Ufficio non aperto al pubblico, scuola, autorimessa privata, attività produttive in genere, depositi, capannoni industriali
B	Gli occupanti sono in stato di veglia e non hanno familiarità con l'edificio	Attività commerciale, autorimessa pubblica, attività espositiva e di pubblico spettacolo, centro congressi, ufficio aperto al pubblico, ristorante, studio medico, ambulatorio medico, centro sportivo
C [1]	Gli occupanti possono essere addormentati:	
Ci	• in attività individuale di lunga durata	Civile abitazione
Cii	• in attività gestita di lunga durata	Dormitorio, residence, studentato, residenza per persone autosufficienti
Ciii	• in attività gestita di breve durata	Albergo, rifugio alpino
D	Gli occupanti ricevono cure mediche	Degenza ospedaliera, terapia intensiva, sala operatoria, residenza per persone non autosufficienti e con assistenza sanitaria
E	Occupanti in transito	Stazione ferroviaria, aeroporto, stazione metropolitana
[1] Quando nel presente documento si usa C la relativa indicazione è valida per Ci, Cii, Ciii		

Tabella G.3-1: Caratteristiche prevalenti degli occupanti

δ_{α}	Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio t_{α} [s]	Esempi
1	600 Lenta	Materiali poco combustibili distribuiti in modo discontinuo o inseriti in contenitori non combustibili.
2	300 Media	Scatole di cartone impilate; pallets di legno; libri ordinati su scaffale; mobili in legno; automobili; materiali classificati per reazione al fuoco (capitolo S.1)
3	150 Rapida	Materiali plastici impilati; prodotti tessili sintetici; apparecchiature elettroniche; materiali combustibili non classificati per reazione al fuoco.
4	75 Ultra-rapida	Liquidi infiammabili; materiali plastici cellulari o espansi e schiume combustibili non classificati per la reazione al fuoco.

Tabella G.3-2: Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio

Figura 95 – Tabelle riguardanti le caratteristiche prevalenti degli occupanti e la velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio.

Allo stesso modo, la norma britannica BS 9999:2008 “Code of practice for fire safety in the design, management and use of buildings” si basa su alcune variabili

che caratterizzano gli occupanti; tra quelle utili al fine della presente valutazione si ha:

- Stato di veglia/stato di sonno;
- Conoscenza/non conoscenza dei luoghi;
- Presenza di soggetti che ricevono cure mediche.

Table 2 Occupancy characteristics

Occupancy characteristic	Description	Examples
A	Occupants who are awake and familiar with the building	Office and industrial premises
B	Occupants who are awake and unfamiliar with the building	Shops, exhibitions, museums, leisure centres, other assembly buildings, etc.
C	Occupants who are likely to be asleep:	
Ci	• Long-term individual occupancy	Individual flats without 24 h maintenance and management control on site
Cii	• Long-term managed occupancy	Serviced flats, halls of residence, sleeping areas or boarding schools
Ciii	• Short-term occupancy	Hotels
D ^{A)}	Occupants receiving medical care	Hospitals, residential care facilities ^{B)}
E ^{C)}	Occupants in transit	Railway stations, airports

^{A)} Currently occupancy characteristic D, medical care, is dealt with in other documentation and is outside the scope of this British Standard.
^{B)} Under some circumstances, residential care facilities may be classified as occupancy characteristic Cii.
^{C)} This occupancy characteristic is included for completeness within this table but is not referred to elsewhere in this British Standard.

Figura 96 – Tabella riguardante le caratteristiche degli occupanti.

Un parametro certamente da considerare è poi il carico di incendio che, come definito nel Decreto Ministeriale 3 agosto del 2015, è il “potenziale termico netto della totalità dei materiali combustibili contenuti in uno spazio, corretto in base ai parametri indicativi della partecipazione alla combustione dei singoli materiali”.

Il carico di incendio specifico di progetto è invece “il carico di incendio riferito all’unità di superficie lorda di piano, espresso in MJ/m² corretto in base ai parametri indicatori del rischio di incendio del compartimento antincendio e dei fattori relativi alle misure antincendio presenti. Esso costituisce la grandezza di

riferimento per le valutazioni della resistenza al fuoco delle opere da costruzione”.

La procedura di calcolo del carico di incendio specifico di progetto è definita nel capitolo S.2 del Codice, e passa attraverso la determinazione di fattori che considerano:

- Il rischio di incendio in relazione alla dimensione del compartimento;
- Il rischio di incendio in relazione al tipo di attività svolta nel compartimento;
- Le differenti misure antincendio del compartimento.

Il carico di incendio specifico di progetto contiene quindi al suo interno altri parametri, come l’attività svolta, la dimensione dei compartimenti, le misure antincendio presenti e il contributo degli elementi strutturali lignei; tali parametri però necessiterebbero di essere valutati singolarmente, vista la loro importante incidenza sul rischio. Per evitare ridondanze è quindi possibile utilizzare un altro parametro, che è il valore medio della densità di carico di incendio, che è riportato nel Codice in funzione dell’attività svolta nell’edificio in questione.

Attività	Valore medio (MJ/m ²)	Frattile 80% (MJ/m ²)
Civili abitazioni	780	948
Ospedali (stanza)	230	280
Alberghi (stanza)	310	377
Biblioteche	1500	1824
Uffici	420	511
Scuole	285	347
Centri commerciali	600	730
Teatri (cinema)	300	365
Trasporti (spazio pubblico)	100	122

Figura 97 – Tabella riguardante la densità di carico di incendio da UNI EN 1991-1-2.

Infine, è stato rielaborato un quadro generale di parametri, sulla base di quanto proposto dall'NFPA (National Fire Protection Association), che raggruppa le variabili nelle seguenti macro-classi:

- Caratteristiche dell'edificio;
- Vie di fuga e allarme;
- Sistema di estinzione e contenimento dell'incendio.

Categoria	Sottocategoria	Descrizione
Caratteristiche dell'edificio	Tipologia di struttura	Edificio in muratura portante, edificio con ossatura portante in calcestruzzo e tamponamenti in muratura, edificio con struttura in acciaio, edificio in legno, ecc.
	Strategia di evacuazione	Evacuazione simultanea dell'intero edificio, evacuazione degli utenti nella zona interessata dall'incendio
	Altezza antincendio dell'edificio	Altezza massima misurabile dal livello inferiore dell'apertura più alta dell'ultimo piano abitabile e/o agibile, al livello del piano esterno più basso
	Area dell'edificio	Superficie lorda dell'edificio. Valore legato al carico di incendio
	Indice di affollamento	È legato al tipo di utenza e consente di ipotizzare il numero di persone a rischio
	Tipologia di utenza	Gli occupanti dormono o sono svegli, hanno conoscenza dell'edificio oppure no, ecc.
	Sistema di rilevazione	Rilevazione fumi manuale, automatica, rilevazione di calore automatica, o rilevazione tramite sistema sprinkler
	Sistema di allarme	Solo nell'appartamento, tarato su tre piani, attivazione simultanea automatica o manuale

Vie di fuga e allarme	Vie di fuga e accesso alle uscite	Numero di scale, compartimentazione delle scale e dei corridoi, materiali di rivestimento su pareti/soffitti lungo la via di fuga, presenza o assenza di porte antincendio, uscita aperta o bloccata, esposizione al fuoco delle facciate alle scale, scale esterne accanto alla facciata, esposizione al fuoco della facciata all'uscita della via di esodo, parti di facciata che cadono a terra sopra l'uscita
	Gestione	Gestione domestica, manutenzione di tutti i sistemi di sicurezza antincendio passivi/attivi
	Controllo fumi	Controllo del fumo presente nelle vie di uscita, controllo del fumo/pressurizzazione su scale o corridoi
Sistema di estinzione e contenimento dell'incendio	Sprinkler	Estensione del sistema (nessuna, parziale, in tutto l'edificio), risposta rapida o standard, fornito da rete pubblica o con serbatoio dedicato, pompe antincendio
	Accessibilità ai vigili del fuoco	Accesso perimetrale all'edificio, idranti circostanti l'edificio, accessibilità alla facciata in fiamme, posizione della stazione dei vigili del fuoco/tempo di risposta, misure antincendio interne, sistemi di comunicazione
	Compartimentazione	Porte e muri tagliafuoco tra appartamenti o altre stanze

Figura 98 – Tabella riportante il quadro generale di parametri, sulla base di quanto proposto dall'NFPA.

6.5.3 Analisi dei parametri relativi al sistema di facciata

La determinazione dei parametri al variare dei quali varia il comportamento al fuoco della facciata, non può che essere fatta mediante delle prove. È quindi necessario assoggettare a dei test i diversi tipi di sistema di facciata per i quali si vogliono definire tali parametri, osservarne il comportamento, per poi comprendere e documentare tali parametri e la loro influenza.

In generale, è possibile individuare le seguenti categorie di parametri:

- Materiali impiegati;
- Tecnologia costruttiva;
- Caratteristiche geometriche.

Potrebbe sembrare immediata la scelta di ricorrere interamente a materiali incombustibili ma la scelta del materiale isolante di facciata, così come la scelta dei materiali che costituiscono i serramenti, ecc. non può che essere condotta dal progettista considerando una serie di aspetti tra i quali:

- L'aspetto economico;
- La conducibilità termica dei materiali;
- La compatibilità tra i materiali di rivestimento e il supporto;
- L'appropriatezza di un materiale alla tecnologia costruttiva scelta;
- La massa-volumica del materiale;
- Ecc.

È quindi necessario indagare altre vie percorribili, che consentano di raggiungere la sicurezza al fuoco delle facciate senza ricorrere necessariamente a materiali isolanti incombustibili, o quantomeno senza ricorrere interamente ad essi.

Inoltre, assumono grande importanza i sistemi passivi all'interno del progetto del sistema di facciata, come ad esempio sistemi di compartimentazione, aerazione, filtri a prova di fumo, sganci elettrici, ecc., per contrastare le mancate o insufficienti strategie attive.

Emerge, di conseguenza, la necessità di conoscere quale sia il comportamento al fuoco dei sistemi ventilati, testandoli appunto come "sistemi finiti".

Sulla base di quanto esposto, si ritiene quindi utile “scorporare” l’analisi del rischio in due macro-parti, cercando così di circostanziare problemi diversi:

- La stima di un livello di rischio di incendio della facciata sulla base dei parametri precedentemente esposti, basati sulla conoscenza degli scenari di incendio possibili e sui principi generali della prevenzione incendi, soprattutto per quando riguarda lo scenario di incendio all’interno dell’edificio;
- La determinazione dell’aggravio o riduzione del rischio data dal sistema ventilato, dall’impianto FV, e dalle altre caratteristiche di reazione al fuoco dei vari materiali presenti in facciata.

Si ritiene quindi di passare per i seguenti punti:

- Stima del livello di rischio “di partenza” dell’edificio, a prescindere dalla tipologia facciata;
- Probabilità che l’incendio possa raggiungere la facciata dall’interno, oppure interessarla direttamente dall’esterno per quanto riguarda gli altri scenari;
- Stima dell’entità del danno sulla base delle caratteristiche degli occupanti;
- Determinazione dei parametri al variare dei quali varia e/o peggiora il comportamento della facciata, se investita da incendio.

6.5.4 Aggravio del rischio di incendio per presenza di impianto FV

Come è facile dedurre, fra i vari parametri che incidono sul rischio di incendio, ve ne è uno in particolare che, eventualmente, può provocare un aggravio del rischio.

P1 - EDIFICI ADIACENTI
P2 - INTERVENTO VIGILI DEL FUOCO
P3 - FACCIATE
P4 - DIMENSIONI MASSIME DEI COMPARTIMENTI
P5 - REAZIONE AL FUOCO DEI MATERIALI COSTRUTTIVI
P6 - CHIUSURE DEI COMPARTIMENTI
P7 - VIE DI ESODO
P8 - SISTEMI DI CONTROLLO DEL FUMO E DEL CALORE
P9 - SISTEMI DI ESTINZIONE
P10 - SISTEMI DI RILEVAZIONE ED ALLARME INCENDI
P11 - IMPIANTI ELETTRICI
P12 - ORGANIZZAZIONE E GESTIONE DELLA SICUREZZA ANTINCENDIO
P13 - MATERIALI PRESENTI
P14 - TIPO DI ATTIVITA' E PERSONE PRESENTI
P15 - DANNI AMBIENTALI
P16 - OPERE STRATEGICHE O VINCOLATE
P17 - AGGRAVIO DEL RISCHIO PER LA PRESENZA DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Figura 99 – Lista di parametri che influiscono sul rischio di incendio.

Infatti, la presenza di un impianto fotovoltaico (P17) necessita di una valutazione del rischio particolareggiata, in modo tale da verificare l'eventuale aggravio del rischio di incendio, che potrebbe concretizzarsi per il fabbricato servito in termini di:

- interferenza con il sistema di ventilazione dei prodotti della combustione (ostruzione parziale/totale di traslucidi, impedimenti apertura evacuatori);
- ostacolo alle operazioni di raffreddamento/estinzione di involucri combustibili;
- rischio di propagazione delle fiamme all'esterno o verso l'interno del fabbricato (presenza di condutture su un fabbricato suddiviso in più compartimenti – modifica della velocità di propagazione di un incendio in un fabbricato mono compartimento).

A questo proposito, si riporta un modello matematico che viene utilizzato spesso per definire il Livello di rischio di incendio in termini quantitativi, rappresentato dal seguente algoritmo:

$$CLT = CLP_1 - CLP_{FV}$$

Dove:

- CLT è la classe totale del rischio;
- CLP_1 rappresenta la classe dell'attività, escludendo l'aggravio del rischio per la presenza di eventuali impianti fotovoltaici;
- CLP_{FV} è appunto l'aggravio del rischio a causa di impianti FV.

Il valore di CLP_1 è determinato secondo la seguente formula:

$$CLP_1 = \sum_{i=1}^{16} CLP_i \cdot W_i$$

Dove:

- CLP_i rappresenta la classe del parametro i-esimo;
- W_i è il corrispondente peso.

Tali misure adottate o di fatto già presenti, sono inserite come scelte parametriche per la determinazione del livello di rischio e come fattori compensativi del rischio residuo; infatti, il livello del rischio residuo è determinato in funzione della Classe Totale dell'attività (CLT):

CLT	LIVELLO RISCHIO
> 3,5	Basso
$1,5 \leq RR \leq 3,5$	Medio
< 1,5	Alto

Figura 100 – Classificazione del livello di rischio a seconda del CLT.

A questo punto, ogni parametro i che incide sul rischio di incendio (da P1 a P16) può essere suddiviso in sottoclassi, e ad ognuna viene assegnato un valore di CLP_i e W_i che saranno poi utili per determinare il livello di rischio residuo.

Una volta arrivati al parametro P17, bisogna calcolare l'aggravio di rischio a causa della presenza di impianti fotovoltaici:

$$CLP_{FV} = FV \cdot \left(1,2 - \frac{D_{OK}}{N_{TOT}} \right)$$

con:

PARAMETRO	VALORE
FV	$FV = 0$ in assenza di impianto fotovoltaico $FV = 1$ in presenza di impianto fotovoltaico
D_{OK}	Numero di quesiti con risposta affermativa (corrispondente ad un requisito valutato positivamente)
N_{TOT}	Numero totale di quesiti con risposta diversa da "QUESITO NON APPLICABILE (NP)"
Nota: Se $FV = 0$ allora $CPL_{FV} = 0$	

Figura 101 – Metodo di calcolo del CLP_{FV}

In generale, gli elementi valutati in questo caso sono:

1. Caratteristiche del piano di posa per la congruità della propagazione degli incendi dall'impianto FV al fabbricato nel quale è incorporato;
2. Interferenza con i sistemi di ventilazione dei prodotti di combustione (EFC, cavità di ventilazione, aperture di facciata, camini, lucernari, ecc.);
3. Sicurezza degli operatori addetti alla manutenzione dell'impianto FV;
4. Propagazione dell'incendio dal fabbricato all'impianto FV;
5. Sicurezza degli addetti alle operazioni di soccorso.

Il rischio aggiuntivo per la presenza di impianti FV è condotto sulla base di alcuni quesiti, e si evidenzia che la presenza di tali impianti incrementa comunque la classe totale del rischio di incendio (CLT), benché possa non costituire complessivamente un aggravio del rischio residuo inteso come superamento del livello di rischio associato al valore di RR.

I quesiti relativi alla valutazione dell'aggravio di rischio sono i seguenti:

- A. Possibili propagazioni orizzontali e verticali dell'incendio, con origine dall'impianto FV verso altre attività esercitate su edifici adiacenti o verso compartimenti adiacenti.
- Può considerarsi esclusa la possibilità di propagazione dell'incendio attraverso i materiali combustibili di isolamento e/o di rivestimento?
- B. Sovrapposizione o vicinanza dell'impianto FV ad attività, con possibile aggravio di rischio d'incendio.
- L'impianto FV non è in corrispondenza di attività che, anche se non soggette a controllo di prevenzione incendi, possono costituire comunque aggravio di rischio in caso d'intervento di soccorso tecnico urgente, quali ad esempio: deposito di prodotti tossici o corrosivi o inquinanti, depositi di prodotti infiammabili e/o combustibili, depositi e/o serbatoi di gas in pressione?
- C. Prescrizioni di prevenzione incendi per l'installazione di impianti fotovoltaici su edifici esistenti.
- L'impianto FV è progettato, realizzato e mantenuto conformemente alla regola d'arte?
 - L'impianto FV funziona in bassa tensione?
 - L'impianto FV non costituisce causa primaria di incendio o esplosione nelle attività circostanti?
 - L'impianto FV non fornisce alimento o via privilegiata di propagazione degli incendi?
 - L'impianto FV non costituisce rischio di folgorazione per i soccorritori in caso d'incendio, in riferimento alla possibilità di interferenza dei getti

idrici degli impianti di spegnimento con le parti dell'impianto FV in tensione, collocate a monte del punto di disconnessione?

- Tutte le parti dell'impianto FV a monte del punto di disconnessione sono esterne all'edificio oppure, se interne, sono ubicate in appositi vani tecnici compartimentati?
 - I moduli FV, le condutture elettriche e le altre parti d'impianto sono tutti installati a distanza superiore a 1 metro dalle aperture?
- D. Dispositivi di protezione minima del vano tecnico o dell'area d'installazione dei componenti dell'impianto FV.
- E. Reazione al fuoco dei componenti dell'impianto FV.
- Tutti i componenti dell'impianto (moduli, conduttori, canali, scatole di derivazione) hanno caratteristiche di reazione al fuoco certificate secondo le norme tecniche di prodotto?
- F. Protezione dal rischio di propagazione d'incendio all'interno dell'edificio proveniente dall'impianto FV.
- I moduli FV e componenti d'impianto di potenza sono posti su strutture di tipo incombustibile?
 - È evitata la posa di moduli FV e componenti d'impianto di potenza in aderenza ad elementi destinati all'isolamento termico degli elementi edilizi di tipo combustibile con reazione al fuoco e/o capacità autoestinguenta ignota?
- G. Protezione dal rischio di folgorazione durante le operazioni di estinzione d'incendio.
- H. Protezione dai contatti diretti ed indiretti.
- I. Posizione degli apparecchi (moduli, quadri, inverter).

- Gli inverter e i quadri a corrente alternata sono protetti dall'acqua e/o possiedono grado di protezione IP 44?
- Gli apparecchi non sono installati in ambienti dove sono potenzialmente possibili atmosfere esplosive?

J. Sovratensioni.

K. Dispositivi di emergenza.

- È presente un dispositivo di emergenza in grado di sezionare il generatore FV in maniera tale da evitare che l'impianto elettrico all'interno del compartimento/fabbricato possa rimanere in tensione ad opera dell'impianto fotovoltaico stesso?

Dopo aver risposto a tali quesiti è possibile valutare l'ammontare dell'aggravio del rischio di incendio causato dall'integrazione di un impianto fotovoltaico in un edificio.

7. Misure di prevenzione antincendio in facciate BIPV

Una volta che si è a conoscenza del tipo di rischio di incendio presente in una determinata attività, è possibile individuare delle misure di prevenzione e protezione antincendio, e di programmazione temporale di queste ultime, in modo tale da garantire la sicurezza antincendio dell'intero edificio.

Tali misure possono essere atte a ridurre la probabilità del verificarsi dell'incendio, in questo caso sono dette "di prevenzione", e/o a mitigare le eventuali conseguenze, in questo caso invece si parla di misure "di protezione".

La scelta della specifica tipologia di intervento da attuare sull'edificio in questione dipende appunto dal livello di rischio individuato, considerando bisognose di intervento in via prioritaria tutte quelle situazioni in cui tale livello sia maggiore di quello accettabile.

Facendo riferimento al caso specifico di una facciata ventilata BIPV, con quindi un sistema fotovoltaico integrato nell'involucro, il livello di rischio "di partenza" è già piuttosto elevato a causa del sistema costruttivo stesso, che incorpora un'intercapedine di aria ventilata; inoltre, tutto ciò viene "peggiorato" dalla presenza dell'impianto FV, e quindi dalle condizioni di rischio dovute al funzionamento elettrico. Di conseguenza, risulta necessario applicare delle misure preventive di sicurezza antincendio, sia di tipo passivo che di tipo attivo, in modo tale da ridurre al minimo il livello di rischio totale.

7.1 Misure relative alla compartimentazione dell'edificio

- Posizionare elementi tagliafuoco in modo tale da suddividere l'edificio in compartimenti;

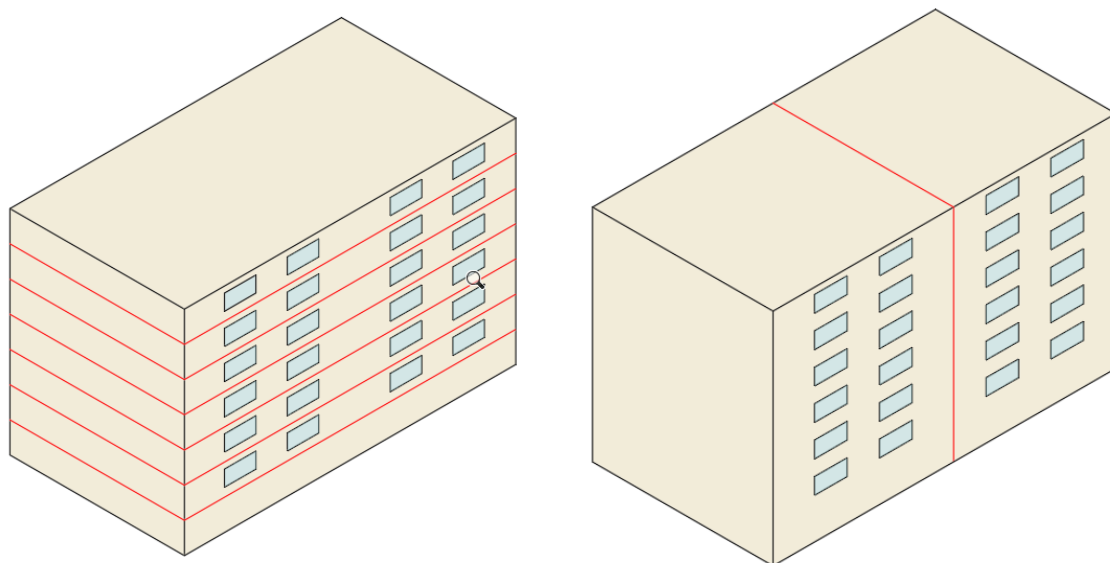


Figura 102 – Compartimentazione interna orizzontale di piano e verticale.

- Limitare la propagazione dell'incendio ad un'area che coinvolga non più di due piani al di sopra di quello dove esso si è sviluppato;
- Predisporre degli elementi tagliafuoco, preferibilmente perpendicolari alla facciata, che facciano proseguire il sistema di compartimentazione interno anche in facciata in corrispondenza di ogni piano, in modo tale da non permettere la propagazione dell'incendio verticalmente da un compartimento all'altro;

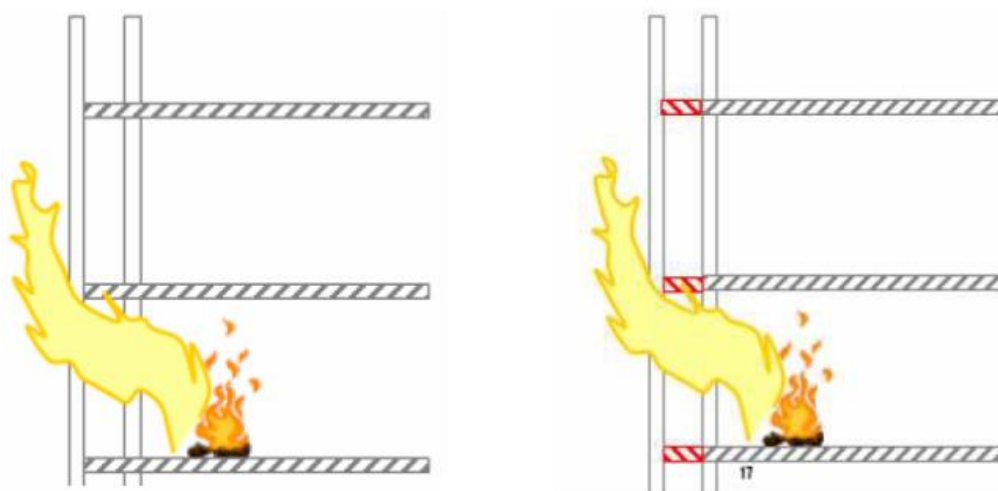


Figura 103 – Propagazione in facciata di un incendio proveniente dall'interno.

- Dimensionare la corretta resistenza al fuoco del nodo fra solaio di compartimentazione e facciata, in modo tale che questa giunzione sia come minimo EI 60, nel caso di edifici che superano i 10 m di altezza;
- Nel caso in cui l'elemento di facciata non poggi direttamente sul solaio (curtain wall), bisogna assicurare la stessa classe di resistenza al fuoco fino a filo facciata; di conseguenza il nodo costruttivo tra solaio e facciata deve essere risolto riempiendo tale gap in modo tale da raggiungere anche qui una resistenza al fuoco almeno EI 60. Una soluzione utilizzabile in questo caso è quella di realizzare un intasamento in lana di roccia e posizionare un lamierino metallico. Nello specifico, si potrebbe utilizzare uno strato di lana di roccia come riempimento del gap esistente fra il filo facciata ed il solaio e, in questo modo, garantire il requisito I di isolamento mediante delle verifiche che, seguendo l'Eurocodice EN 1991-1-2, vanno a valutare la temperatura media e massima puntuale in corrispondenza della superficie non esposta al fuoco (estradosso). Inoltre, il requisito di tenuta E viene raggiunto posizionando dei lamierini metallici, ad esempio in acciaio zincato con 1 mm di spessore, opportunamente fissati alla soletta tramite ritegni meccanici. Dal momento che l'incendio, provenendo dal basso, andrebbe a coinvolgere in primo luogo tali elementi metallici posti all'intradosso, con conseguente rischio di rammollimento del lamierino, essi vengono protetti da una doppia lastra in calcio silicato.
- Prevedere barriere al fuoco o sigillature dei telai delle aperture di facciata (porte e finestre);

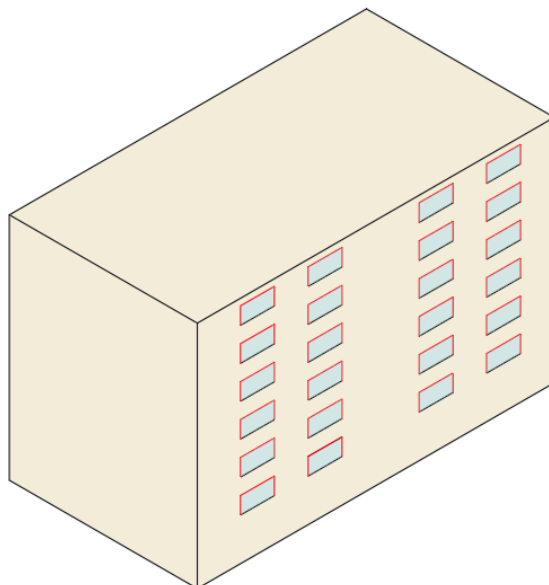


Figura 104 – Compartimentazione attorno alle aperture di facciata.

- Posizionare delle scatole antincendio, con struttura metallica, fissandole alla parete sul perimetro delle aperture e sigillandole con lana minerale;
- Prevedere che le uscite delle vie di esodo al piano terra siano provviste di pensilina, in modo tale da proteggere le persone in fuga da eventuali cadute di oggetti e/o parti di facciata.

7.2 Misure relative alla scelta dei materiali di facciata

- Nel caso di facciate che presentano isolante combustibile, utilizzare uno spessore minore, in modo tale da ottenere un minore carico d'incendio;
- Scegliere materiali di rivestimento della facciata ventilata con una corretta reazione al fuoco; tali materiali devono essere incombustibili e/o non permettere la propagazione di fiamme e fumi, in modo tale da non rappresentare un carico d'incendio aggiuntivo;
- Per garantire la resistenza al fuoco della facciata è necessario utilizzare una fra le seguenti misure:

- Elemento E 60 ef (o→i) di lunghezza, in sviluppo verticale, pari ad almeno 1 m, sostituibile con una sporgenza orizzontale E 60 di 60 cm; tale elemento, detto “pannello parafiamma”, può essere costituito dal solaio R/EI 60, da un lamierino metallico e da una doppia lastra in calcio silicato. Nel momento in cui si verifica il collasso della facciata, bisogna comunque garantire il permanere di questa barriera di lunghezza superiore ad 1 m, avente caratteristiche di resistenza al fuoco superiori a E 60 ef (o→i), in modo tale da impedire la propagazione dell’incendio fra i vari piani da un compartimento all’altro, per un tempo non inferiore a 60 minuti;

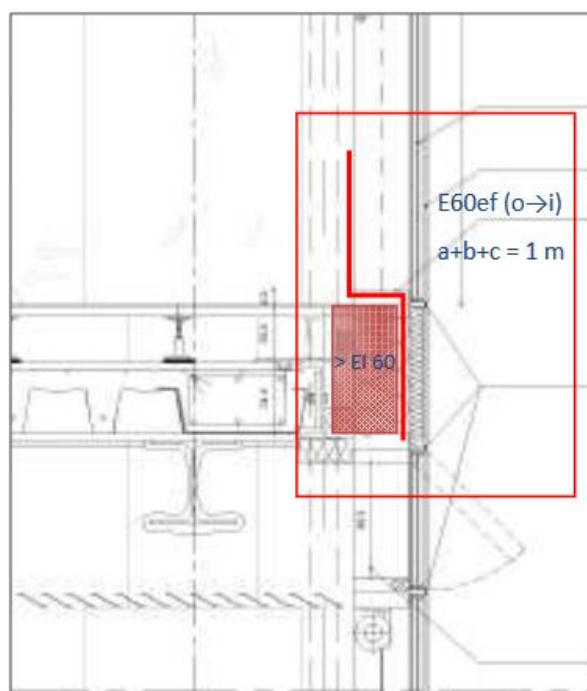


Figura 105 – Esempio di pannello parafiamma.

- Resistenza di facciata come minimo E 30 per l’intera altezza dell’edificio, o come minimo E 60 ogni due livelli;
 - Sistema automatico di sprinkler;
- Scegliere una adeguata reazione al fuoco dell’intero sistema costruttivo finito di facciata (che comprende: rivestimento, intercapedine, isolante, fissaggi,

pannelli, ecc.), considerando esentato al massimo il 5 % dell'intera superficie di facciata:

- Edifici di altezza inferiore ai 10 m: D-s3,d0;
- Edifici di altezza superiore ai 10 m e uguale o inferiore ai 18 m: B-s3,d1;
- Edifici di altezza superiore ai 18 m: B-s3,d0;

7.3 Misure relative alla sicurezza antincendio di facciate ventilate

- Prevedere delle barriere antincendio, sia orizzontali che verticali, all'interno dell'intercapedine ventilata tra la facciata e la struttura portante, posizionate ogni 2/3 piani e come minimo ogni 6 m, il cui requisito può ritenersi soddisfatto senza la necessità di prove, quando si usa un profilo continuo in lamiera di acciaio con spessore di almeno 1 mm, o un equivalente a sbalzo di almeno 20 cm; questa seconda opzione è però da considerarsi solo teorica e non applicabile in realtà, per problemi legati all'azione del vento, estetica, ecc.;

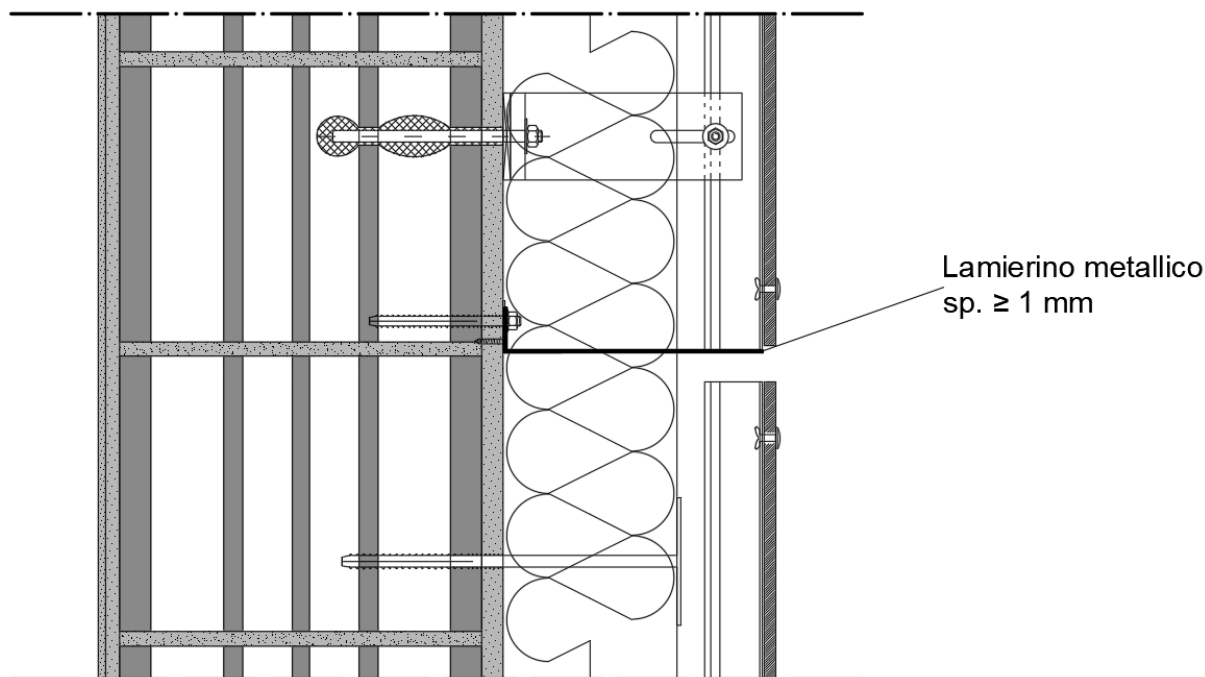


Figura 106 – Sistema di facciata ventilata con cavity barrier costituita da un lamierino continuo metallico fissato meccanicamente e in pressione contro l'isolante.

- Inserire le barriere tagliafuoco E 30, intumescenti o non intumescenti, nell'intercapedine, in continuità con i solai resistenti al fuoco che dividono i vari compartimenti;
- In alternativa alle classiche barriere tagliafuoco, utilizzare un elemento espandente che aumenta di volume in caso di incendio, e va ad interrompere l'intercapedine;
- In alternativa, utilizzare barriere ad "espulsione" automatica, che funzionano mediante anemometri termici che misurano gli aumenti di variazioni di temperatura;
- Utilizzare, nell'intercapedine, materiali isolanti di classe A1 di reazione al fuoco;
- Scegliere una corretta reazione al fuoco dello strato di isolante presente all'interno dell'intercapedine:
 - Edifici di altezza uguale o inferiore ai 10 m: D-s3,d0;
 - Edifici di altezza superiore ai 10 m e uguale o inferiore ai 28 m: B-s3,d0;
 - Edifici di altezza superiore ai 28 m: A2-s3,d0;
- Nel caso sia presente isolamento combustibile, cioè di classe inferiore a A1, è necessario suddividere in parti anche gli strati isolanti, oltre alla cavità ventilata, mediante delle fasce orizzontali non combustibili e resistenti alla corrosione, che presentano una pendenza del 5 % per far defluire l'acqua;

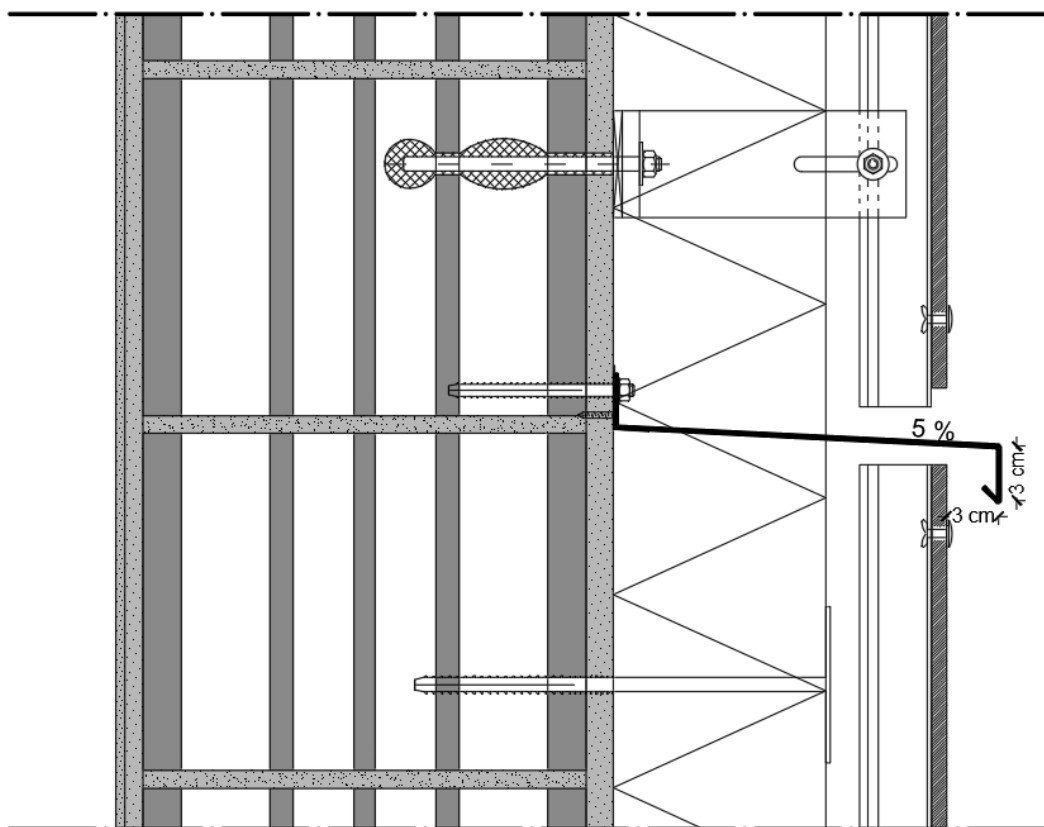


Figura 107 – Sistema di facciata ventilata con cavity barrier che interrompe sia l'intercapedine ventilata che lo strato di isolamento combustibile.

- All'interno di un sistema di facciata ventilata, l'isolamento di classe inferiore a B-s1 deve essere adeguatamente protetto;
- La sottostruttura metallica della facciata ventilata, adeguatamente protetta e isolata, deve essere fissata in corrispondenza di ogni livello della struttura portante, utilizzando dei tasselli di fissaggio R 60;
- Inserire un sistema automatico di spegnimento ad acqua all'interno dell'intercapedine;
- Progettare un'intercapedine di spessore ridotto, in modo tale da generare una minore propagazione dell'incendio ai piani superiori;
- Prevedere un sistema di evacuazione dei fumi, tramite la ventilazione naturale, posizionato sia nella parte bassa che nella parte alta della facciata ventilata, di aria pari al 10 % della sezione orizzontale della camera;

7.4 Misure relative alla sicurezza antincendio degli impianti FV in facciata

- Interporre fra i moduli FV ed il piano di appoggio uno strato di materiale incombustibile di resistenza al fuoco almeno EI 30;
- Mantenere una distanza minima di 1 m fra moduli, condutture, inverter, quadri, e qualsiasi altro eventuale apparato, e le aperture;
- Dimensionare adeguatamente i sovraccarichi e, di conseguenza, i cortocircuiti, come anche le protezioni, in modo tale da avere conduttori corretti nei confronti dei limitatori di corrente;
- Dimensionare correttamente il sistema di raffreddamento degli inverter;
- Utilizzare, per tutti i componenti dell'impianto FV, materiali incombustibili, come ad esempio tubi in acciaio zincato e conduttori con isolamento resistente al fuoco, e comunque certificati;
- Utilizzare pannelli FV con modulo in silicio, termicamente stabile, e adesivo poliuretano; tali pannelli sono di gran lunga superiori a quelli con resina epossidica, che invece si scioglie se sottoposta ad alte temperature;
- Preferire pannelli con una struttura vetro-vetro, piuttosto che vetro-plastica;
- Utilizzare i nuovi incapsulanti EVA a base di materiali ibridi contenenti silicone e fosforo, in modo tale da migliorarne l'effetto ritardante in caso di incendio;
- Scegliere pannelli FV che presentano incapsulante sufficientemente indurito, in modo tale da evitare la fessurazione dovuta alla pressione esercitata dai componenti volatili;
- Scegliere moduli FV con un backsheet di maggiore spessore, dal momento che questo comporta un maggiore tempo di resistenza al fuoco e un aumento del punto di infiammabilità;
- Scegliere moduli FV con un backsheet più pesante, in modo tale da presentare una minore velocità di propagazione della fiamma;

- Utilizzare cavi resistenti ai raggi UV ed alle alte temperature, di sezione adeguata e correttamente collegati;
- Assicurarsi che la guaina dei cavi dell'impianto FV non perda l'isolamento durante tutto il periodo di funzionamento;
- Preferire scatole di derivazione in metallo, piuttosto che in resina;
- Utilizzare quadri di stringa con una protezione superiore a IP 65, in modo tale da aumentarne la protezione all'acqua;
- Non posizionare i quadri di stringa in corrispondenza della fine della falda di una copertura, in modo tale da non trovarsi a contatto con l'acqua piovana;
- I sistemi BIPV devono avere come minimo una classe di reazione al fuoco E;
- È necessario prevedere una posa adeguata, in modo tale da avere meno promiscuità possibili, e installare l'impianto FV a regola d'arte;
- Operare una corretta manutenzione, seguendo le norme CEI, come ad esempio un esame a vista per controllare la coerenza dell'impianto realizzato con il progetto esecutivo, e analisi termografiche che misurano i gradienti di temperatura;
- Operare una corretta e continuativa pulizia di tutti i componenti dell'impianto FV;
- Controllare la questione dell'ombreggiamento dei moduli FV, soprattutto nel caso di BIPV in facciata, dal momento che questo causerebbe il fenomeno dell'hot-spot; assicurarsi che non vi siano alberi e/o edifici adiacenti che possano generare ombra su parti del campo FV integrato sull'involucro, e valutare bene le conseguenze del progettare edifici con facciate inclinate o incassate;
- Prevedere Sistemi RSS di Spegnimento Rapido, che vadano ad operare partizioni programmate sul circuito elettrico in modo che la tensione

continua DC generata tra i moduli sia minore rispetto al valore pericoloso per la folgorazione (120 V);

- Predisporre un dispositivo di protezione e rilevamento degli archi voltaici, che disconnetta il circuito difettoso e tutti i componenti coinvolti;
- Prevedere e implementare il sezionamento dell'impianto, nella sua parte più bassa raggiungibile dal personale qualificato, in modo tale da evitare la propagazione dell'incendio; in questo modo si ottiene un miglioramento del rispetto delle norme, ma anche un aumento dei costi;
- Prevedere un dispositivo di spegnimento di emergenza del campo FV, in modo tale da interrompere il generatore FV nel punto in cui il circuito elettrico fa ingresso nell'edificio;
- Prevedere un sistema di supervisione delle varie stringhe, che percepisca le diminuzioni di generazione in una stringa e vada poi a disattivarla.

7.5 Linee guida per edifici con facciate ventilate BIPV

In questa sezione, si ipotizza di star progettando un edificio di uffici di tipo convenzionale, con struttura a telaio in calcestruzzo armato e tamponamenti in blocchi di laterizio alveolati, situato nella periferia di Milano (MI).

Si tratta di un edificio di nuova costruzione multipiano, alto 24,5 m e che presenta sette piani fuori terra e uno interrato. Per altezza antincendio, in questo caso pari a 21 m, si intende, secondo il D.M. 30/11/83, la massima altezza misurata dal livello inferiore dell'apertura più alta dell'ultimo piano abitabile e/o agibile, escluse quelle dei vani tecnici, al livello del piano esterno più basso. Gli edifici civili con altezza antincendio superiore a 24 m devono essere progettati in modo da consentire una rapida e sicura evacuazione in caso d'incendio, seguendo la norma specifica D.M.16/05/1987 n° 246. Tale decreto riporta però anche le misure di prevenzione incendi per gli edifici con altezza antincendio

superiore a 12 m ed inferiore a 24 m, anche se non soggetti a controllo da parte dei VV.F.. In effetti, nel nostro caso, ricadiamo in quest'ultima categoria, nello specifico in classe A, cioè con altezza antincendio fra i 12 m e i 24 m.

Classe dell'edificio	Altezza antincendio
A	Da 12 m a 24 m
B	Da 24 m a 32 m
C	Da 32 m a 54 m
D	Da 54 m a 80 m
E	Oltre 80 m

Figura 108 – Classificazione secondo l'altezza antincendio in edifici civili

L'involucro della costruzione presenta parti trasparenti, costituite da un sistema di facciata continua a cellule, e parti opache, realizzate mediante una facciata ventilata, sulla quale ci andremo a soffermare per quanto riguarda la seguente analisi.

In corrispondenza di quest'ultima, è stato integrato un impianto fotovoltaico, andando quindi a realizzare un sistema BIPV in cui i moduli FV vanno a costituire il rivestimento esterno della facciata opaca. Dato però il comportamento elettrico del fotovoltaico e la sua combustibilità, argomento trattato in seguito in modo approfondito e specifico per il prodotto selezionato, è necessario garantire una distanza di almeno 1 m fra le aperture di facciata e qualsiasi componente dell'impianto FV; di conseguenza viene prevista una seconda

tipologia di rivestimento di facciata per quelle aree adiacenti a porte e finestre, sistemando invece gli elementi BIPV in fasce subverticali.

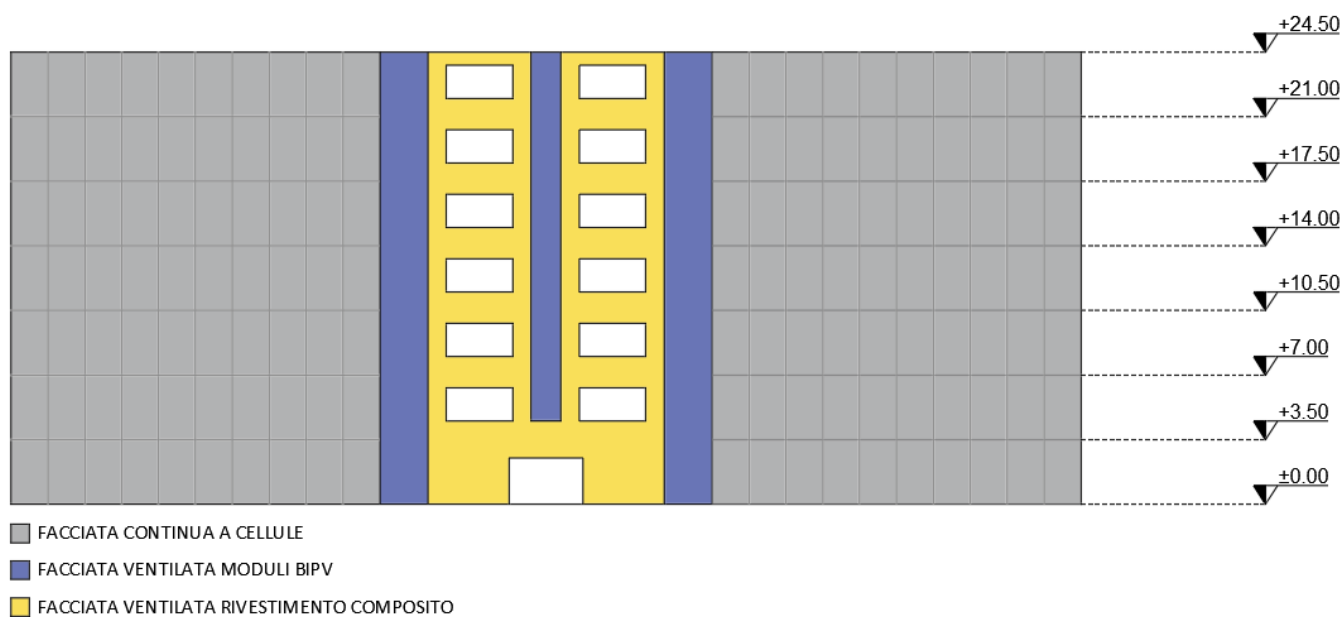


Figura 109 – Rappresentazione schematica dell'edificio del caso studio con i diversi tipi di facciata utilizzati.

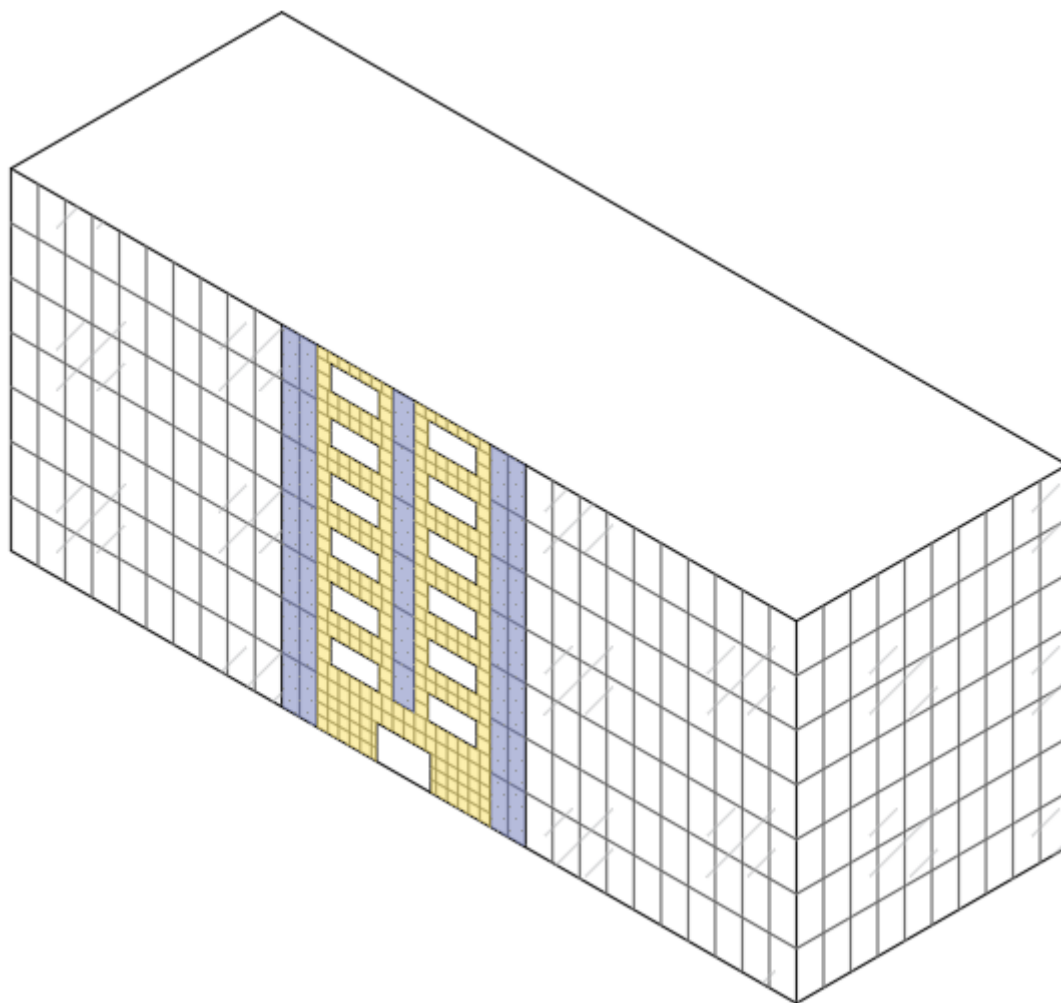


Figura 110 – Rappresentazione 3D dell'edificio del caso studio con moduli BIPV e lastre di rivestimento della facciata ventilata.

Una volta definiti gli aspetti principali di questo intervento, è necessario soffermarsi sul comportamento al fuoco in caso di incendio di questo tipo di edificio e dei suoi componenti, per poi quindi stipulare una serie di linee guida da seguire per poter garantire la sicurezza antincendio del fabbricato.

Naturalmente, le seguenti disposizioni e misure di prevenzione antincendio sono da intendersi come consigli di progettazione, realizzabili o meno anche a seconda del budget a disposizione per l'intervento costruttivo.

Relativamente alla compartimentazione orizzontale di piano, è necessario raggiungere una resistenza al fuoco almeno REI 60 mediante il sistema

costruttivo delle partizioni orizzontali interpiano: il parametro di resistenza meccanica R dipende quindi dallo spessore totale di solette e solai e dalla distanza fra l'asse delle armature e la superficie esposta, mentre, per garantire i requisiti di tenuta e isolamento EI , è necessario che i solai presentino uno strato pieno di materiale isolante, non combustibile e con conducibilità termica non superiore a quella del calcestruzzo, e con spessori mai inferiori a 4 cm.

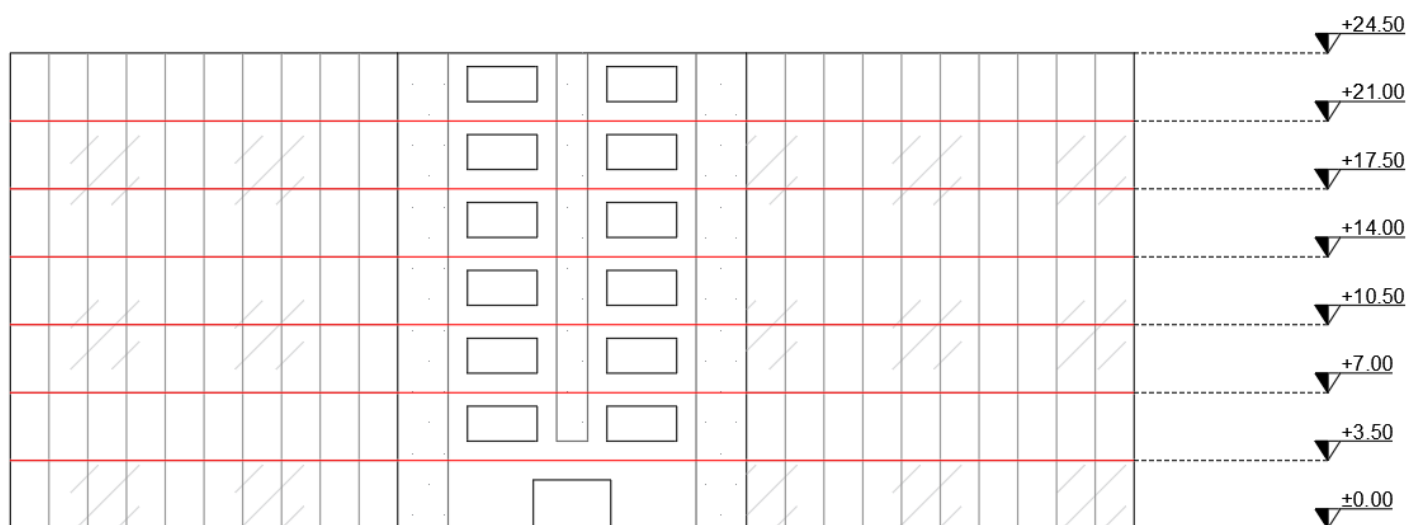


Figura 111 – Rappresentazione schematica dell'edificio del caso studio con la compartimentazione orizzontale di piano.

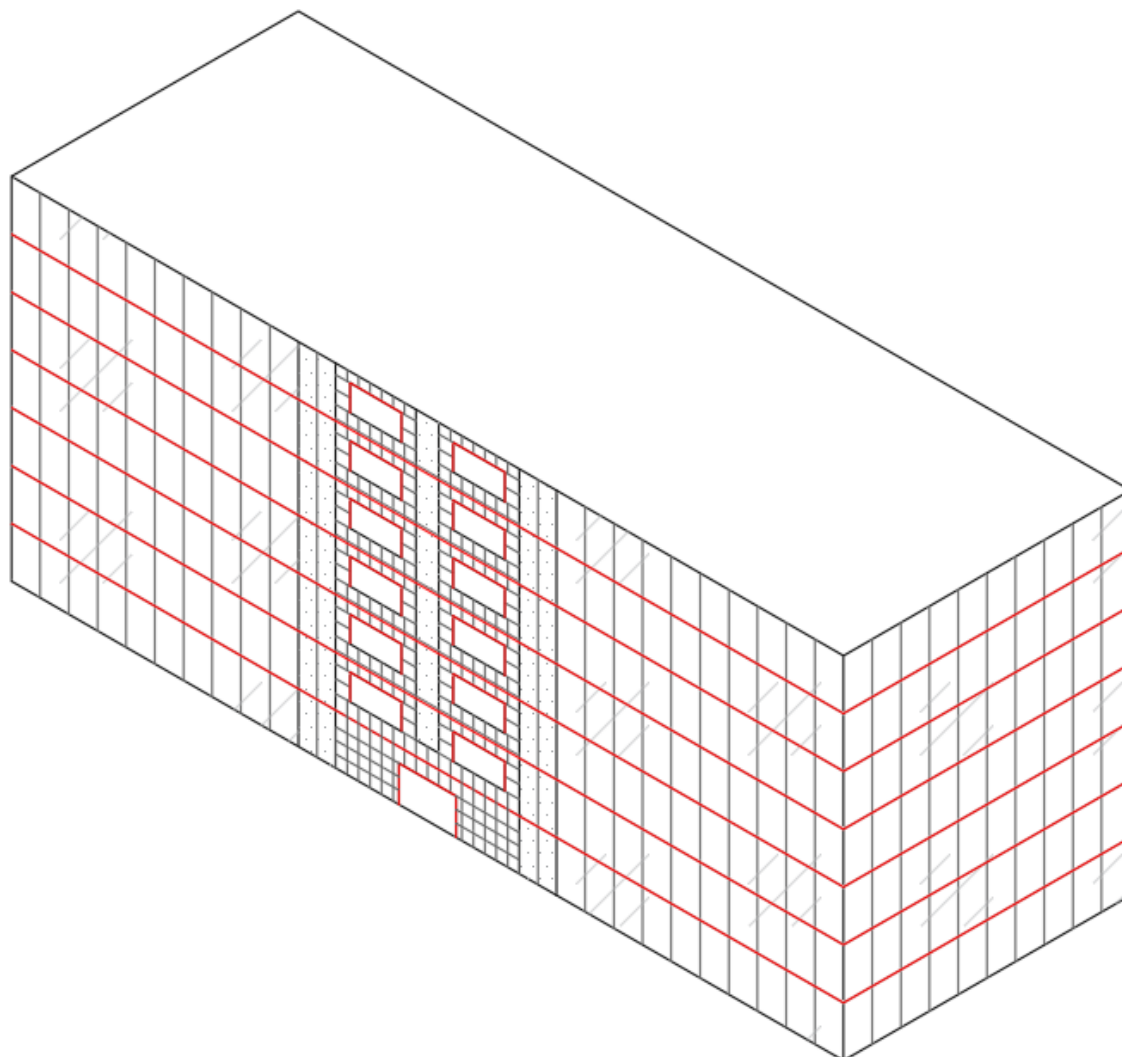


Figura 112 – Rappresentazione 3D dell'edificio del caso studio con compartimentazioni orizzontali di piano e di aperture di facciata.

Come già detto, trattandosi di un edificio che supera i 18 m di altezza, bisogna assicurare una reazione al fuoco dell'intero sistema di facciata, comprendente rivestimento, intercapedine, isolante, fissaggi, pannelli, ecc., pari almeno a B-s3,d0; per raggiungere tale valore di reazione al fuoco viene progettato un sistema costruttivo di facciata ventilata in cui gli elementi costituenti fondamentali siano incombustibili:

- Intercapedine con dimensione totale pari a 17 cm e spessore disponibile per la ventilazione, non occupato dall'isolamento termico, pari a 5 cm;

- Tipologia di isolante specifica per l'applicazione in sistemi di facciate ventilate, in lana di roccia a doppia densità con velo vetro, di classe di reazione al fuoco A1 quindi incombustibile, con spessore 12 cm;
- Elementi metallici incombustibili, come tasselli e staffe di fissaggio in acciaio inox R 60 e sottostruttura in lega di alluminio;
- Elementi in vetro incombustibili per cui, secondo la GUIDA TECNICA, non è richiesta alcuna prestazione di reazione al fuoco;
- Per quanto riguarda guarnizioni, sigillanti e materiali di tenuta, essi vengono tollerati dal momento che occupano una superficie inferiore al 10 % dell'intera superficie della facciata.
- Infine, riguardo il rivestimento di facciata, nel nostro caso si tratta di pannelli BIPV. Secondo quanto previsto dalla "GUIDA TECNICA: Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili", tutti i componenti della facciata, qualora occupino più del 40 % dell'intera superficie della facciata, devono garantire una classe di reazione al fuoco almeno B-s3,d0. Nel nostro caso, i pannelli FV in oggetto occupano una superficie inferiore al 40 % dell'intera superficie della facciata dell'edificio, e possono quindi non rispettare i requisiti di reazione al fuoco sopracitati. Ciò nonostante, sono stati scelti per tale scopo dei pannelli FV "BIPV double laminated glass": si tratta di un prodotto che possiede marcatura CE e che presenta una classe di reazione al fuoco B-s1,d0. I pannelli FV sono di conseguenza certificati per garantire una classe di reazione al fuoco superiore alla classe B-s3,d0, classe che sarebbe stata richiesta dalla GUIDA TECNICA in facciata solo nel caso in cui la superficie occupata dai pannelli fosse superiore al 40 % di quella totale. Si può quindi ritenere che i pannelli BIPV possiedano prestazioni al fuoco superiore rispetto a quanto richiesto dalla GUIDA TECNICA sulle facciate, e si conclude

pertanto che la loro installazione in facciata sia adeguata. Andando ad analizzare in modo più dettagliato questi pannelli BIPV con struttura vetro-vetro, essi presentano due strati di vetro Float, di spessore pari a 6 mm ciascuno, con uno strato intermedio di incapsulante EVA che contiene celle a silicio monocristallino. Lo strato di vetro frontale presenta una configurazione estetica opaca di colore scuro, in modo da nascondere le celle quando non colpito direttamente dalla luce del sole.

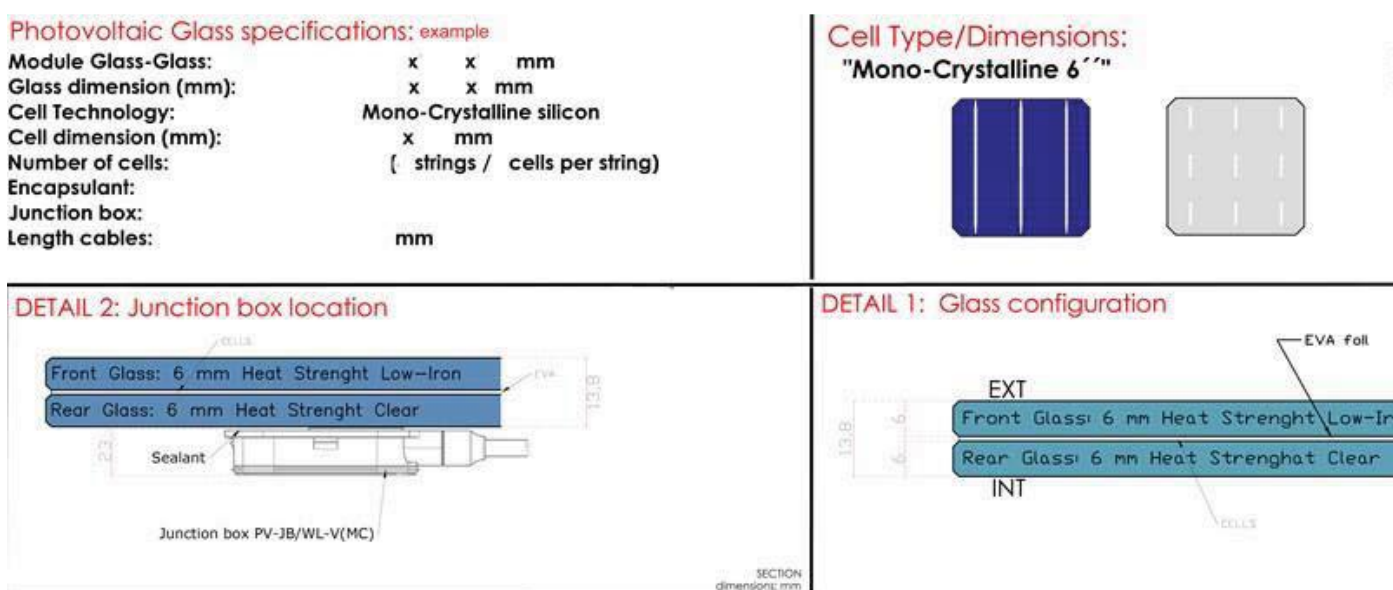
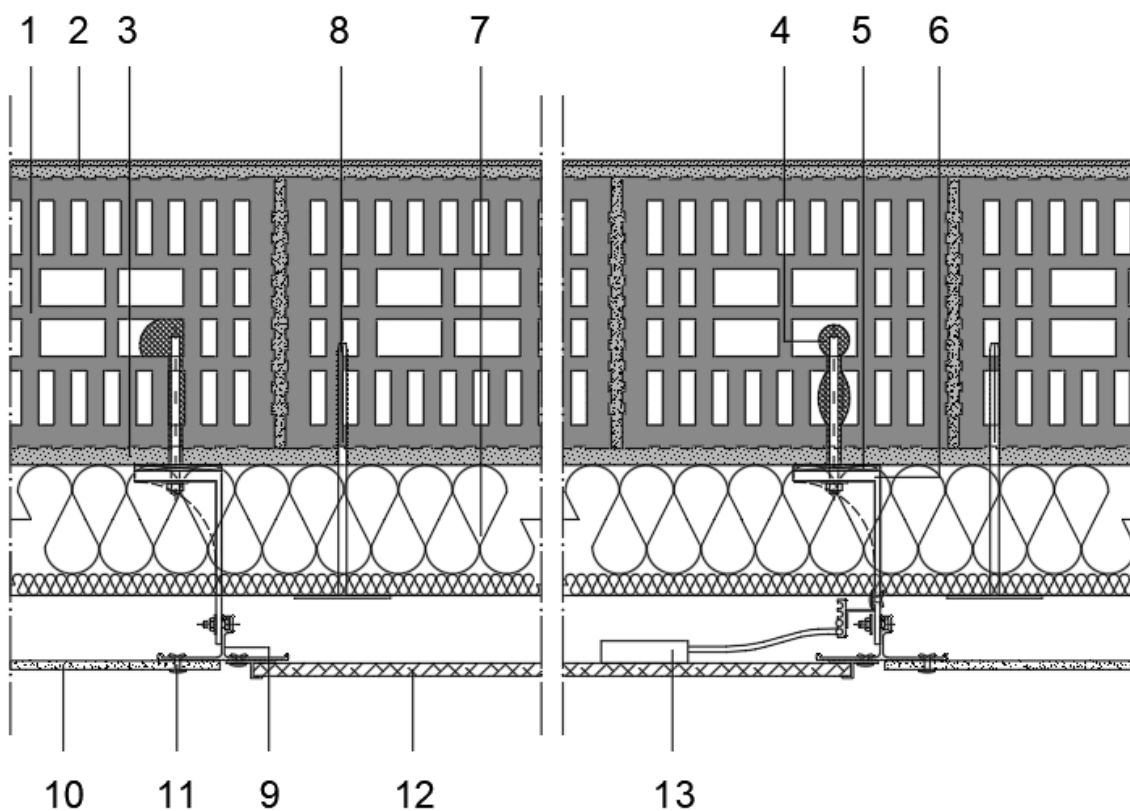
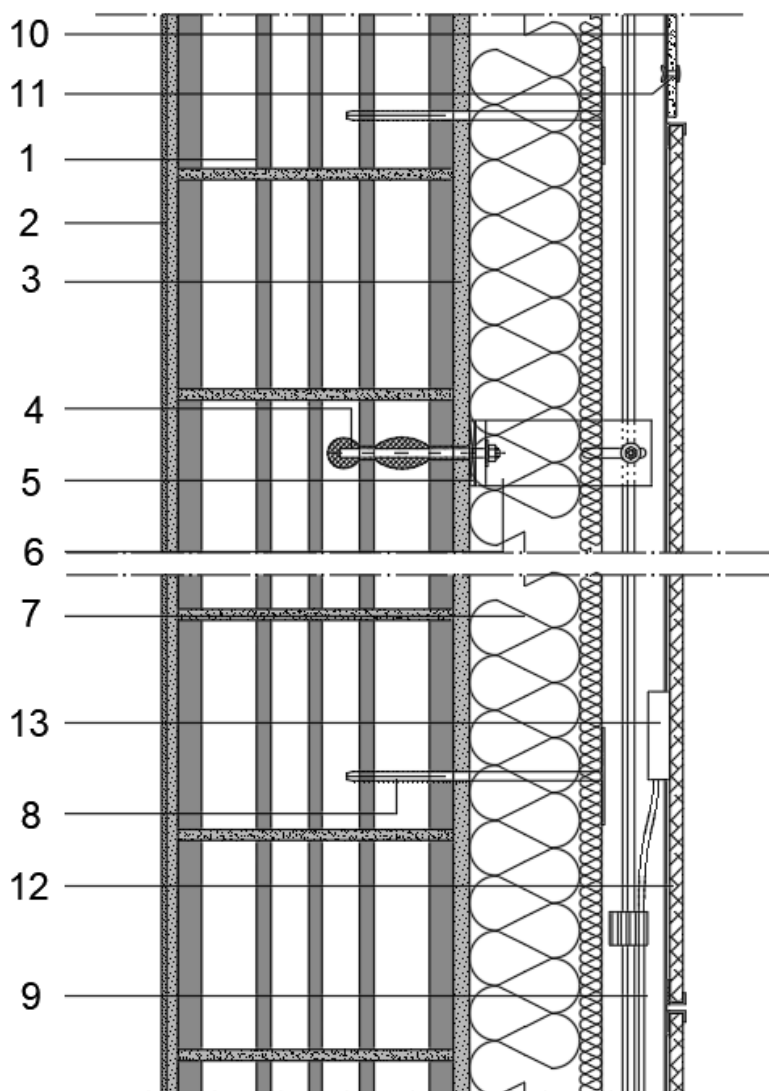


Figura 113 – Caratteristiche tecniche del modulo BIPV vetro-vetro con celle in silicio monocristallino.



1. Muratura di tamponamento in blocchi alveolari
2. Intonaco di base e di finitura, sp. 1,5 cm
3. Intonaco di regolarizzazione in sabbia e cemento, sp. 1,5 cm
4. Ancoraggio di tipo chimico per murature in blocchi alveolari
5. Elemento di separazione staffa – muratura in neoprene, sp. 0,5 cm
6. Staffa in lega di alluminio pressofusa per controvento sottostruttura
7. Isolante in pannelli di lana di roccia a doppia densità con velo vetro, sp. 12 cm
8. Chiodi con rondella per fissaggio isolante
9. Sottostruttura reggilastra a montanti in lega di alluminio estruso
10. Lastra composita sottile di finitura, in lana di roccia ad alta densità, sp. 0,8 cm
11. Rivetto di fissaggio in foro calibrato
12. Pannello fotovoltaico BIPV vetro-vetro con celle in silicio mono-cristallino
13. Connettori e cablaggi dell'impianto di generazione fotovoltaico

Figura 114 - Sezione orizzontale corrente della facciata ventilata con integrazione di modulo BIPV.



1. Muratura di tamponamento in blocchi alveolari
2. Intonaco di base e di finitura, sp. 1,5 cm
3. Intonaco di regolarizzazione in sabbia e cemento, sp. 1,5 cm
4. Ancoraggio di tipo chimico per murature in blocchi alveolari
5. Elemento di separazione staffa – muratura in neoprene, sp. 0,5 cm
6. Staffa in lega di alluminio pressofusa per controvento sottostruttura
7. Isolante in pannelli di lana di roccia a doppia densità con velo vetro, sp. 12 cm
8. Chiodi con rondella per fissaggio isolante
9. Sottostruttura reggilastra a montanti in lega di alluminio estruso
10. Lastra composita sottile di finitura, in lana di roccia ad alta densità, sp. 0,8 cm
11. Rivetto di fissaggio in foro calibrato
12. Pannello fotovoltaico BIPV vetro-vetro con celle in silicio mono-cristallino
13. Connettori e cablaggi dell'impianto di generazione fotovoltaico

Figura 115 - Sezione verticale corrente della facciata ventilata con integrazione di modulo BIPV.

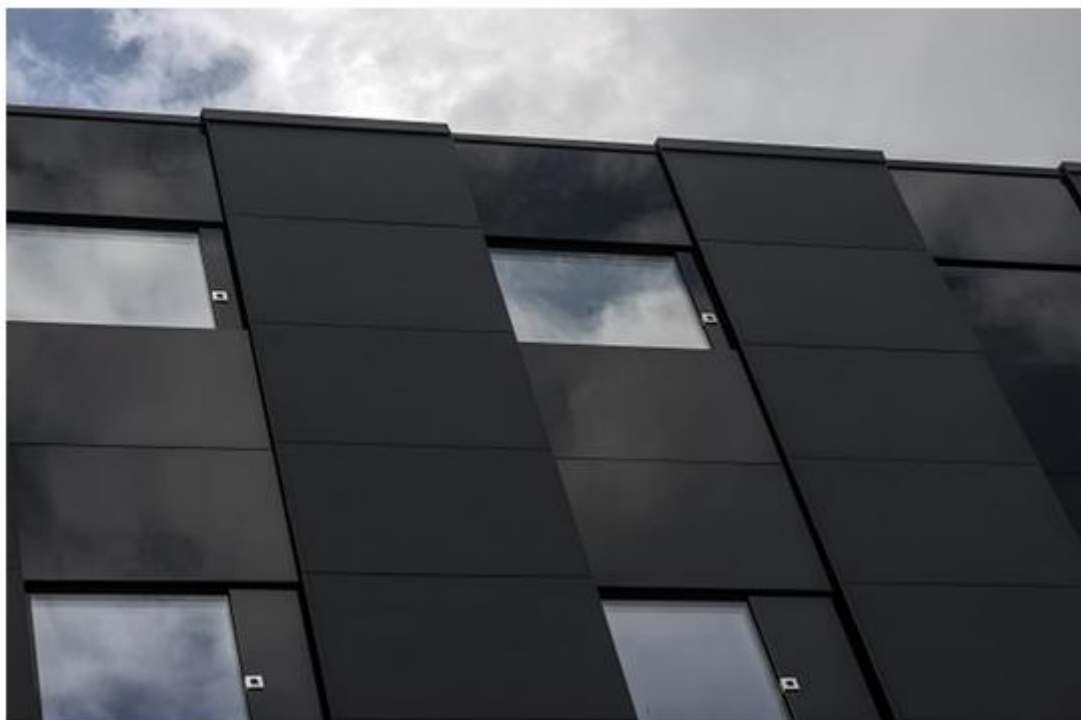
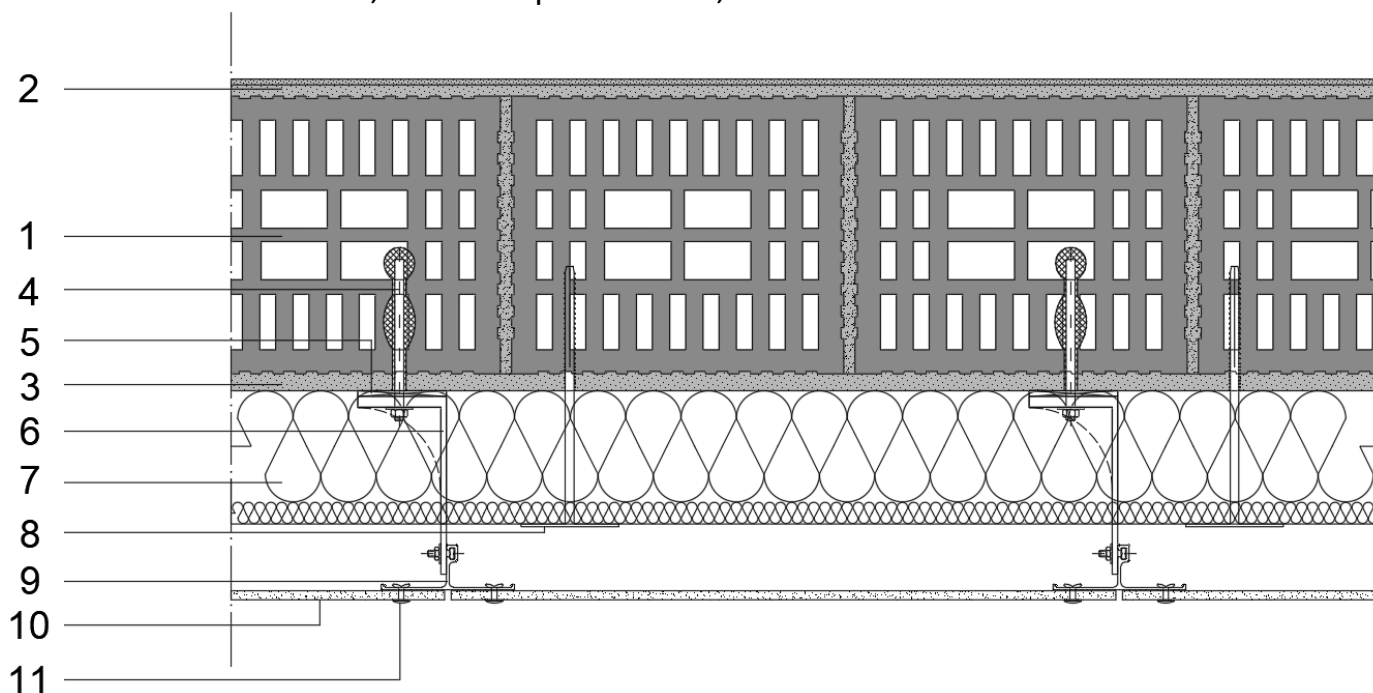


Figura 116 – Esempio di facciata ventilata con sistema di rivestimento BIPV, con finitura opaca oscurata per nascondere le celle.

- Il resto della facciata ventilata, in cui non vengono integrati elementi BIPV, presenta quindi un diverso materiale di rivestimento, sempre incombustibile. A questo scopo, sono state scelte delle lastre composite sottili in lana di roccia ad alta densità, con uno spessore di 0,8 cm.



1. Muratura di tamponamento in blocchi alveolari
2. Intonaco di base e di finitura, sp. 1,5 cm
3. Intonaco di regolarizzazione in sabbia e cemento, sp. 1,5 cm
4. Ancoraggio di tipo chimico per murature in blocchi alveolari
5. Elemento di separazione staffa – muratura in neoprene, sp. 0,5 cm
6. Staffa in lega di alluminio pressofusa per controvento sottostruttura
7. Isolante in pannelli di lana di roccia a doppia densità con velo vetro, sp. 12 cm
8. Chiodi con rondella per fissaggio isolante
9. Sottostruttura reggilastra a montanti in lega di alluminio estruso
10. Lastra composita sottile di finitura, in lana di roccia ad alta densità, sp. 0,8 cm
11. Rivetto di fissaggio in foro calibrato

Figura 117 - Sezione orizzontale corrente della facciata ventilata con rivestimento in lastra composita sottile.

Per quanto riguarda invece le “barriere di apertura”, in questo caso esse costituirebbero una misura aggiuntiva in favore di sicurezza dal momento che, attorno alle aperture, si ha un sistema costruttivo di facciata incombustibile; viene comunque realizzato l’imbotte di porte e finestre mediante doppie lastre in calcio silicato che garantiscano una resistenza al fuoco almeno EI 60, con interposto un lamierino metallico per assicurare stabilità meccanica. In questo modo si impedisce la propagazione dell’incendio proveniente dall’interno dell’edificio verso la facciata.

Inoltre, viene garantita una distanza in verticale fra le aperture in corrispondenza dei vari piani superiore a quella richiesta, pari ad 1 m, dal momento che le finestre distano fra loro 1,70 m verticalmente, in modo tale che le fiamme uscenti da una finestra non possano rientrare nell’edificio attraverso l’apertura allineata al piano superiore.

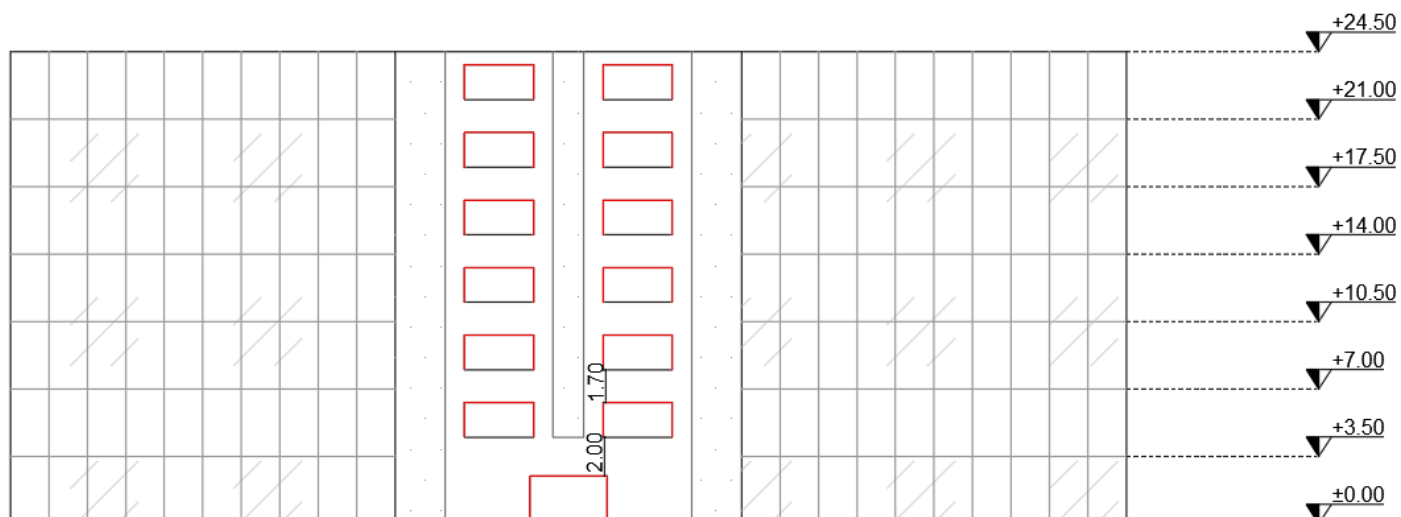
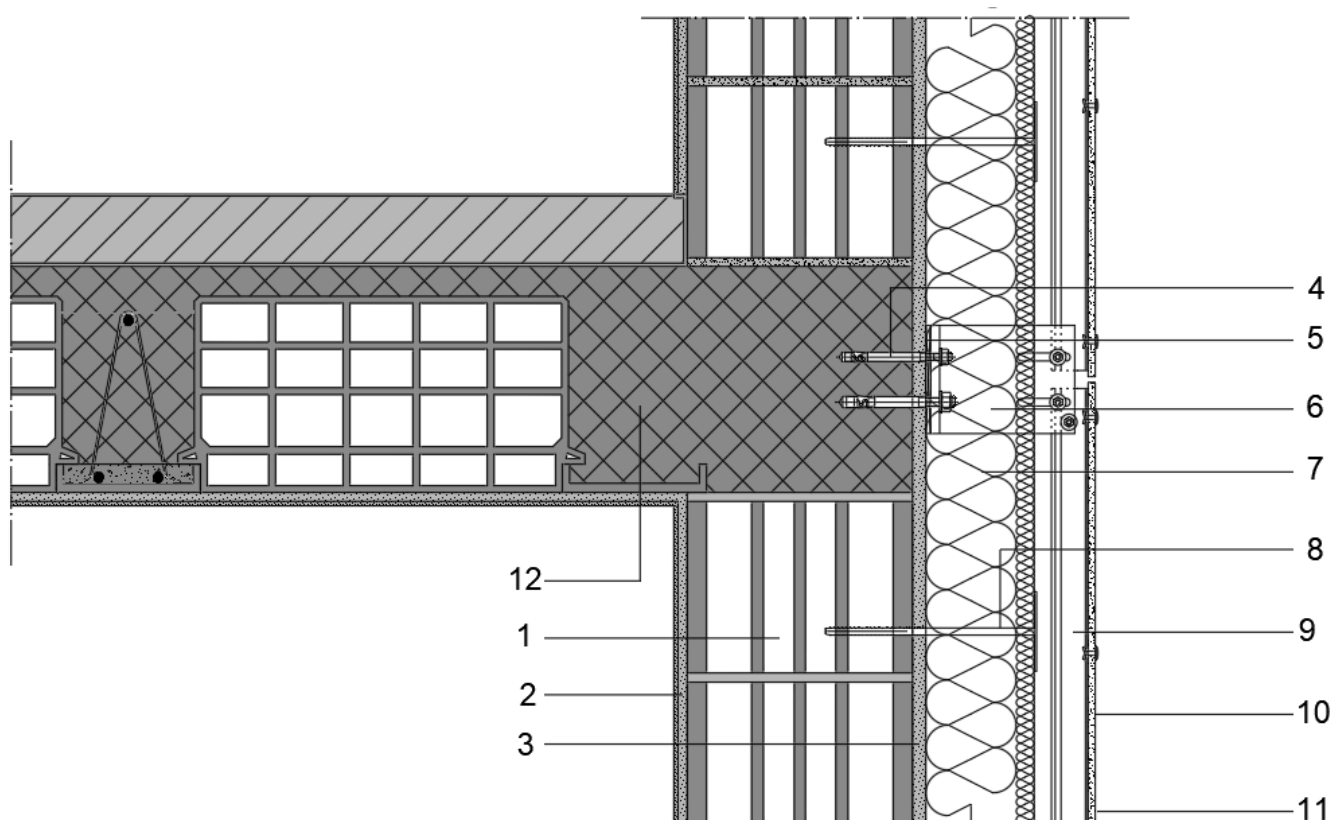


Figura 118 – Rappresentazione schematica dell’edificio del caso studio con le barriere tagliafuoco di apertura.

Non trattandosi di una “curtain-wall”, non vi è il rischio di passaggio delle fiamme da un piano all’altro lungo il perimetro dell’edificio in corrispondenza della facciata, di conseguenza non si presenta la condizione di necessità di riempire il gap fra solaio e filo facciata per raggiungere un valore di resistenza al fuoco EI 60.



1. Muratura di tamponamento in blocchi alveolari
2. Intonaco di base e di finitura, sp. 1,5 cm
3. Intonaco di regolarizzazione in sabbia e cemento, sp. 1,5 cm
4. Ancoraggio di tipo meccanico per elementi in c.a.
5. Elemento di separazione staffa – muratura in neoprene, sp. 0,5 cm
6. Staffa in lega di alluminio pressofusa per controvento sottostruttura
7. Isolante in pannelli di lana di roccia a doppia densità con velo vetro, sp. 12 cm
8. Chiodi con rondella per fissaggio isolante
9. Sottostruttura reggilastra a montanti in lega di alluminio estruso
10. Lastra composita sottile di finitura, in lana di roccia ad alta densità, sp. 0,8 cm
11. Rivetto di fissaggio in foro calibrato
12. Soletta in latero-cemento

Figura 119 - Dettaglio costruttivo soletta-parete di facciata in sezione verticale.

È fondamentale prevedere delle “cavity barriers” che vadano a compartimentare l’intercapedine ventilata orizzontalmente, in modo continuo lungo tutto il perimetro dell’edificio. Piuttosto che utilizzare la più tradizionale tipologia di barriere, realizzate mediante un lamierino metallico continuo fissato meccanicamente in pressione contro lo strato di isolante in lana di roccia, sono state scelte delle barriere termo-espandenti. Il prodotto in questione consiste in una fascia intumescente applicata su isolante in lana di roccia; questo gli permette di mantenere la normale ventilazione della cavità in condizioni di funzionamento standard mentre, in caso di incendio, quando la temperatura raggiunge circa i 250 ° C, questa fascia si espande rapidamente verso l’esterno e va a “sigillare” l’intercapedine, prevenendo il passaggio di fiamme e fumi. A differenza delle barriere continue, che devono essere posizionate ogni 3/4 piani in modo tale da ricreare la ventilazione naturale tra un elemento e l’altro, le barriere espandenti possono essere più ravvicinate fra loro dal momento che, in condizioni normali, vanno solo a ridurre la sezione orizzontale dell’intercapedine: nel nostro caso, verranno installate ogni due piani, a circa 7 m di distanza in verticale l’una dall’altra.

Nel dettaglio, avendo previsto una cavità di 17 cm e uno strato di isolamento termico di 12 cm, le cavity barriers utilizzate, di cui ogni elemento presenta una lunghezza di 1 m e una altezza di 9 cm, hanno uno spessore di 14,5 cm in condizioni normali, lasciando quindi 2,5 cm per la ventilazione naturale dell'intercapedine.



Figura 120 - Disposizione dell'elemento isolante e della barriera antincendio all'interno dell'intercapedine ventilata.

Affinchè tali elementi possano essere considerati cavity barriers secondo il documento "Approved Document B – The Building Regulation, 2018", essi devono essere fissati meccanicamente alla parete.

A tale scopo, vengono utilizzate delle staffe in acciaio zincato posizionate al massimo ogni 50 cm e ancorate mediante fissaggi non combustibili, progettate per essere facilmente sagomabili a mano in loco e per essere tagliate secondo necessità, in modo tale da garantirne una penetrazione all'interno della barriera tagliafuoco, in corrispondenza della metà, per il 75 % circa del suo spessore.

Quest'ultima deve essere poi spinta sufficientemente in fondo in modo tale da assicurarne il pieno contatto con il muro di supporto.



Figura 121 – Staffe in acciaio zincato per il fissaggio delle cavity barriers termo-espandenti.

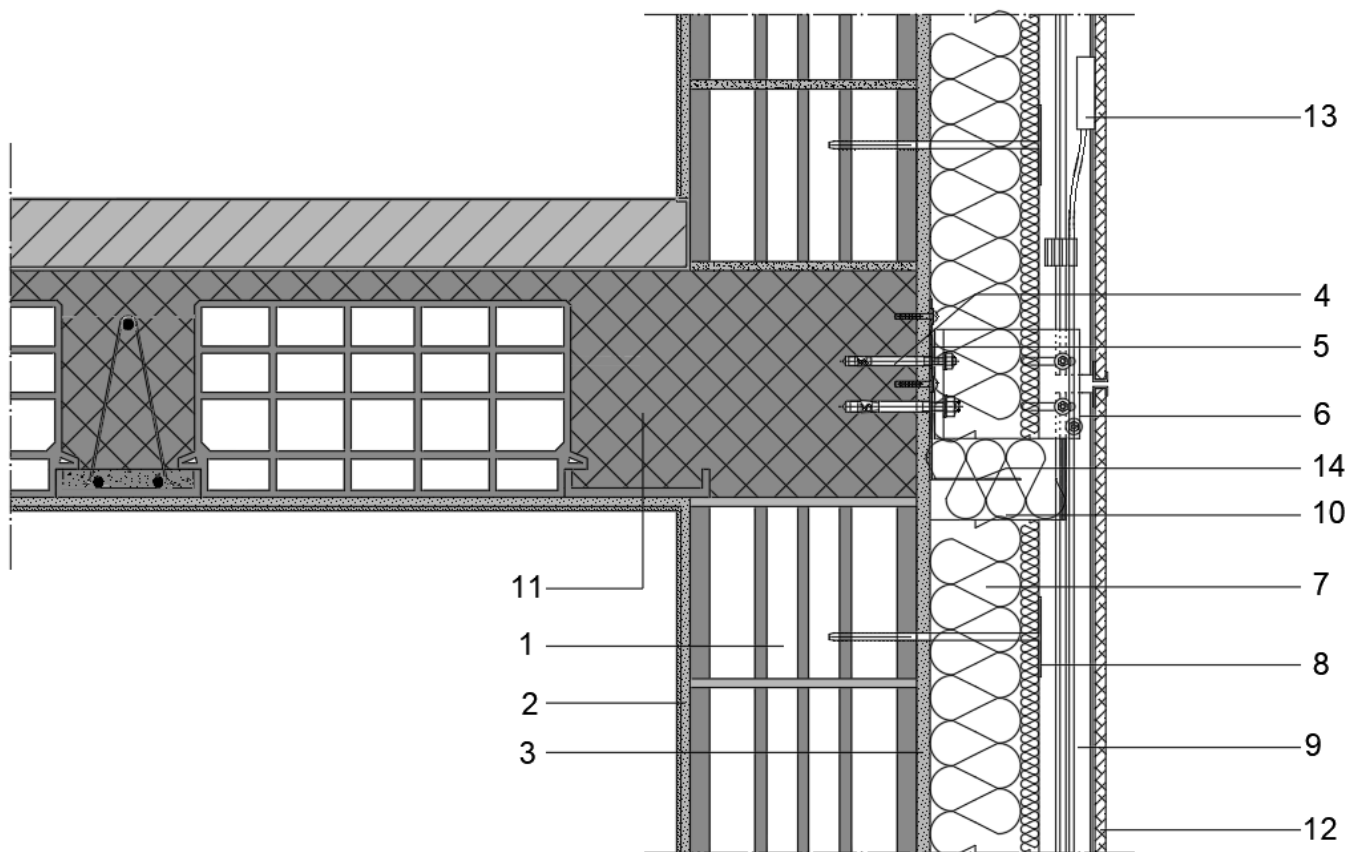
Inoltre, vengono utilizzate delle viti a spirale, tre per ogni metro di lunghezza con una distanza massima fra loro di 333 mm, per proteggere e fissare la fascia frontale intumescente, facendo attenzione che esse non sporgano dalla superficie anteriore della barriera per più di 25 mm.



Figura 122 – Viti a spirale per la protezione della fascia anteriore termo-espandente.



Figura 123 – Fissaggio meccanico delle cavity barriers termo-espandenti.



1. Muratura di tamponamento in blocchi alveolari
2. Intonaco di base e di finitura, sp. 1,5 cm
3. Intonaco di regolarizzazione in sabbia e cemento, sp. 1,5 cm
4. Ancoraggio di tipo meccanico per elementi in c.a.
5. Elemento di separazione staffa – muratura in neoprene, sp. 0,5 cm

6. Staffa in lega di alluminio pressofusa per controvento sottostruttura
7. Isolante in pannelli di lana di roccia a doppia densità con velo vetro, sp. 12 cm
8. Chiodi con rondella per fissaggio isolante
9. Sottostruttura reggilastra a montanti in lega di alluminio estruso
10. Cavity barrier termo-espandente in lana di roccia, sp. 14,5 cm
11. Soletta in latero-cemento
12. Pannello fotovoltaico BIPV vetro-vetro con celle in silicio mono-cristallino
13. Connettori e cablaggi dell'impianto di generazione fotovoltaico
14. Staffa in acciaio zincato per il fissaggio della cavity barrier, introdotta per 3/4

Figura 124 - Dettaglio costruttivo soletta-parete di facciata con cavity barrier termo-espandente in sezione verticale.

Inoltre, sarebbe opportuno prevedere un sistema di evacuazione dei fumi mediante delle aperture che permettano la ventilazione naturale dell'intercapedine, posizionando delle griglie di aerazione sulla superficie verticale della facciata sia nella parte alta che nella parte bassa di essa, di area pari al 10 % della sezione orizzontale dell'intercapedine stessa; infine, un ultimo accorgimento sarebbe quello di installare un impianto di spegnimento automatico ad acqua, comandato da apposito sistema di rivelazione incendi a servizio di ciascun piano dell'edificio, costituito da dispositivi di erogazione (sprinkler) posizionati all'interno della cavità ventilata in corrispondenza di ciascun piano ed orientati verso la parete interna.

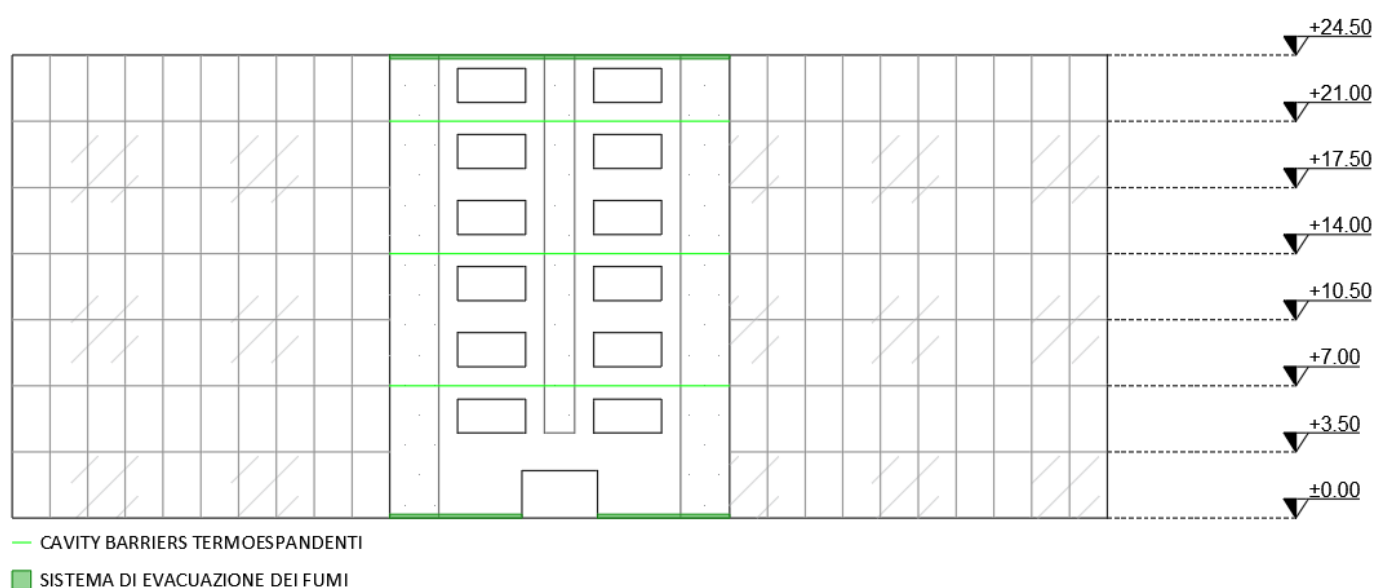


Figura 125 – Rappresentazione schematica dell'edificio del caso studio con le cavity barriers.

Fondamentalmente, la sicurezza antincendio di un impianto fotovoltaico, come di un qualsiasi impianto elettrico, si basa su tre importanti fattori: una posa corretta, un'adeguata scelta dei materiali, e il sezionamento dell'impianto.

Per quanto riguarda il posizionamento dei componenti dell'impianto, come già detto è molto importante mantenere una distanza minima di 1 m fra i vari elementi FV e le aperture di facciata; inoltre è necessario effettuare un'installazione dell'impianto a regola d'arte.

Relativamente alla scelta dei vari materiali, è bene preferire materiali con certificazione CE e sempre incombustibili; ad esempio, in questo caso specifico vengono utilizzati tubi in acciaio zincato, conduttori con isolamento resistente al fuoco, cavi resistenti ai raggi UV con guaina che non perda isolamento durante la vita utile, scatole di derivazione in metallo, e pannelli BIPV con modulo in silicio e adesivo poliuretano, e struttura vetro-vetro con vetro satinato colorato per nascondere le celle.

Durante la fase di progettazione è fondamentale un corretto dimensionamento dei sovraccarichi elettrici di funzionamento e un'attenta valutazione degli elementi circostanti l'edificio, e quindi del potenziale ombreggiamento in facciata che andrebbe ad oscurare parti del campo FV.

Infine, oltre ad una corretta pulizia e manutenzione dell'impianto durante tutto il corso della sua vita utile, secondo le norme CEI, è importante anche prevedere un sistema di rapido spegnimento RSS, se possibile, ed il sezionamento dell'impianto mediante dispositivi di emergenza posizionati nella parte più bassa dell'edificio, in modo da poter essere raggiungibili facilmente dai VV.F..

Come già detto, un sistema RSS è un sistema che, in tempo ragionevole, spegne e va a sezionare l'impianto FV, in modo tale da non avere più corrente e quindi

da fermare il carico, ma continuando ad avere una tensione di sicurezza circolante fra i capi inferiore a 120 V.

Nel caso di pannelli BIPV con struttura del tipo vetro-vetro di un certo spessore integrati in facciata, come nel nostro caso, la propagazione della fiamma trasversalmente da una superficie all'altra è piuttosto difficile e lenta e, di conseguenza, se viene scelto un sistema RSS che funziona mediante sonde di temperatura applicate posteriormente, esse raggiungerebbero un valore sufficientemente alto da provocare l'intervento del sistema RSS quando ormai è troppo tardi, a differenza di ciò che accade nel caso in cui si abbiano moduli FV tradizionali. Quindi, un sistema con sonde di temperatura ha senso o meno a seconda dello spessore del vetro dei pannelli BIPV, perché appunto spesso è difficile che venga rilevata una temperatura realistica, e comunque è molto importante dove vengono posizionate queste sonde.

In generale, la scelta del migliore sistema RSS per un determinato tipo di edificio dipende dalla situazione di partenza: infatti, è importante eseguire una valutazione del rischio che tenga in considerazione non solo l'impianto FV in sé, ma anche il sistema costruttivo in cui viene integrato. Ad esempio, in questo caso in cui si è progettato un sistema costruttivo composto da materiali incombustibili, utilizzando una serie di misure passive di prevenzione, con conseguente maggiore dispendio economico e minor livello di rischio finale di propagazione delle fiamme, è sufficiente utilizzare un sistema RSS più "blando", gestito anche semplicemente manualmente mediante un pulsante da premere in caso di emergenza. Al contrario, se l'edificio in questione avesse presentato una facciata con un comportamento al fuoco poco performante, sarebbe stato più opportuno individuare un sistema RSS che potesse addirittura prevenire gli

archi elettrici, andando quindi ad integrare le misure di precauzione passive mancanti, con quelle attive.

Infine, è importante anche valutare il passaggio dei cavi, dal momento che, se si sceglie di farli passare all'interno dell'edificio, considerando che vi scorre tensione, bisogna garantire una sicurezza per il passaggio in corrente continua. In questo caso, si consiglia di utilizzare dei cavidotti REI verticali e dei tamponamenti REI orizzontali, con appositi passaggi mediante sacchetti di contenimento e chiusure, in modo tale da assicurare la compartimentazione sia verticale che orizzontale.

Per quanto riguarda la compartimentazione perimetrale fra i diversi tipi di involucro, bisogna distinguerne due diverse tipologie: quella utilizzata per separare la porzione subverticale di facciata ventilata BIPV dalla facciata continua, e quella in corrispondenza del cambio di rivestimento della facciata ventilata, da moduli BIPV a lastre composite.

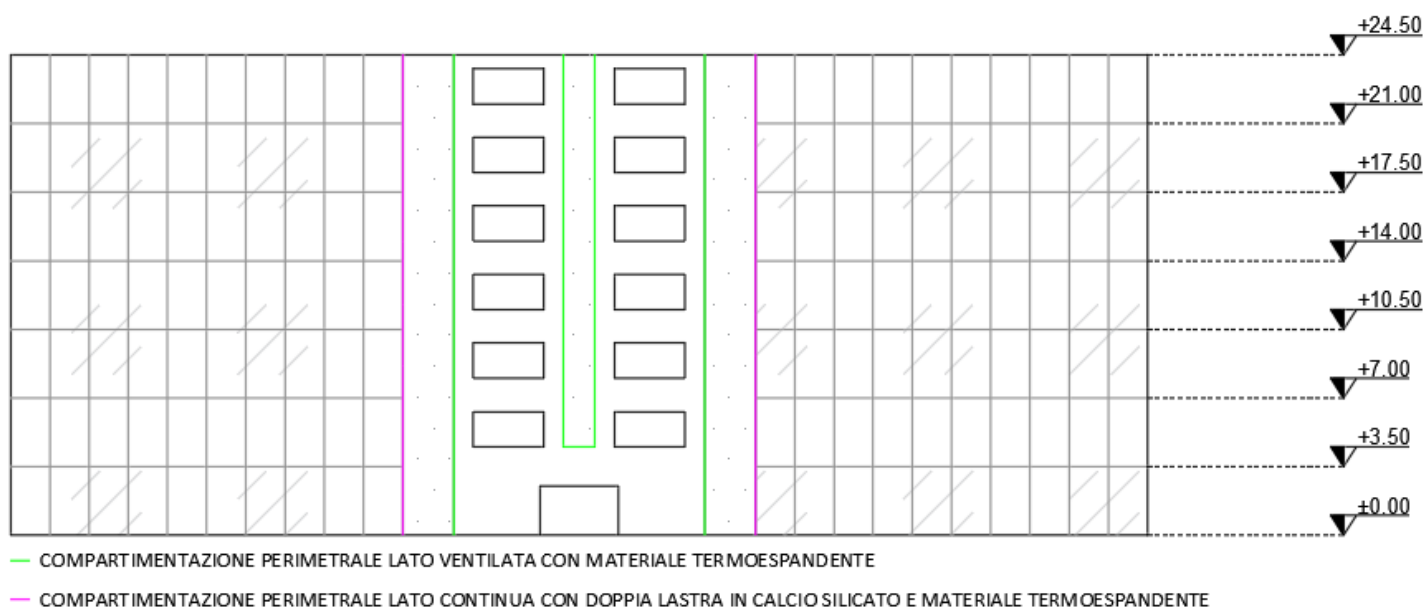
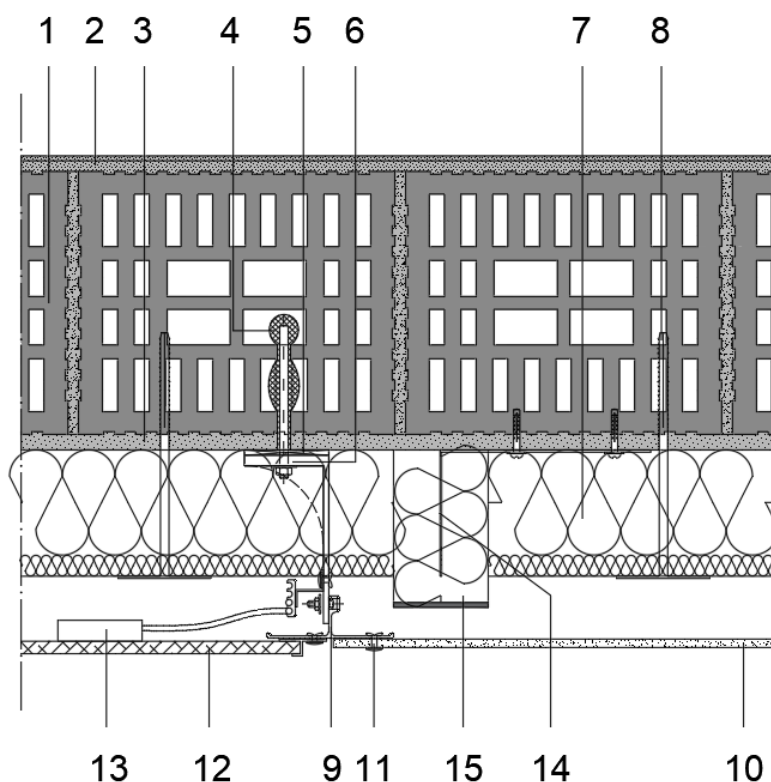


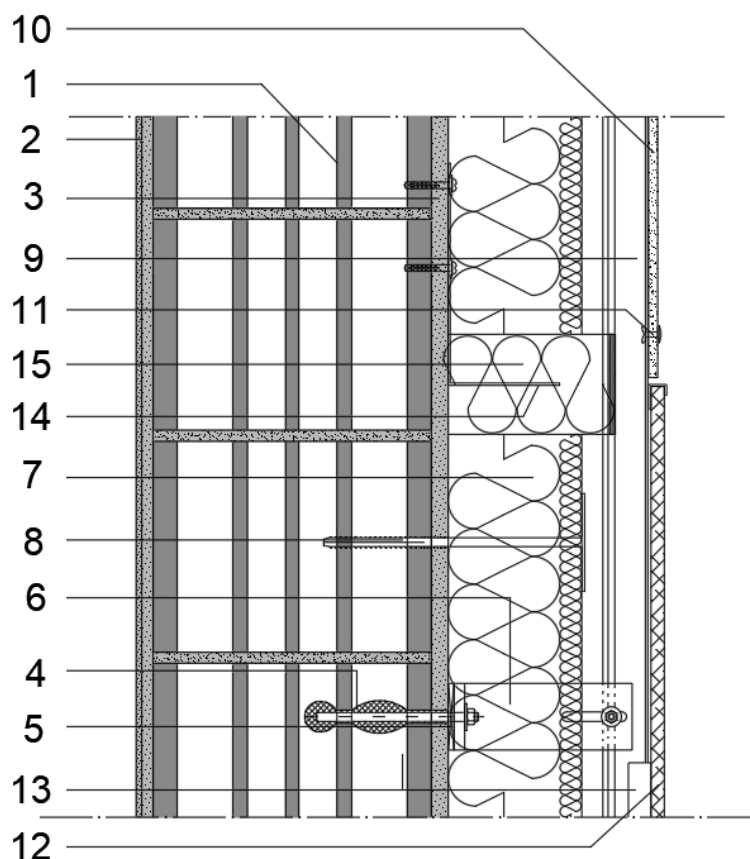
Figura 126 – Rappresentazione schematica dell'edificio del caso studio con la compartimentazione perimetrale fra il sistema BIPV ed il resto della facciata.

La prima consiste nell'utilizzo dello stesso materiale termo-espandente usato come cavity, ma questa volta posizionato in corrispondenza del perimetro della facciata ventilata rivestita da moduli BIPV, quindi sia in verticale che in orizzontale.



1. Muratura di tamponamento in blocchi alveolari
2. Intonaco di base e di finitura, sp. 1,5 cm
3. Intonaco di regolarizzazione in sabbia e cemento, sp. 1,5 cm
4. Ancoraggio di tipo chimico per murature in blocchi alveolari
5. Elemento di separazione staffa – muratura in neoprene, sp. 0,5 cm
6. Staffa in lega di alluminio pressofusa per controvento sottostruttura
7. Isolante in pannelli di lana di roccia a doppia densità con velo vetro, sp. 12 cm
8. Chiodi con rondella per fissaggio isolante
9. Sottostruttura reggilastra a montanti in lega di alluminio estruso
10. Lastra composita sottile di finitura in lana di roccia ad alta densità, sp. 0,8 cm
11. Rivetto di fissaggio in foro calibrato
12. Pannello fotovoltaico BIPV vetro-vetro con celle in silicio mono-cristallino
13. Connettori e cablaggi dell'impianto di generazione fotovoltaico
14. Staffa in acciaio zincato per il fissaggio della cavity barrier, introdotta per $\frac{3}{4}$
15. Elemento termo-espandente per compartimentare perimetralmente la facciata ventilata BIPV

Figura 127 – Sezione orizzontale corrente della facciata ventilata con compartimentazione perimetrale fra rivestimento composito e BIPV.

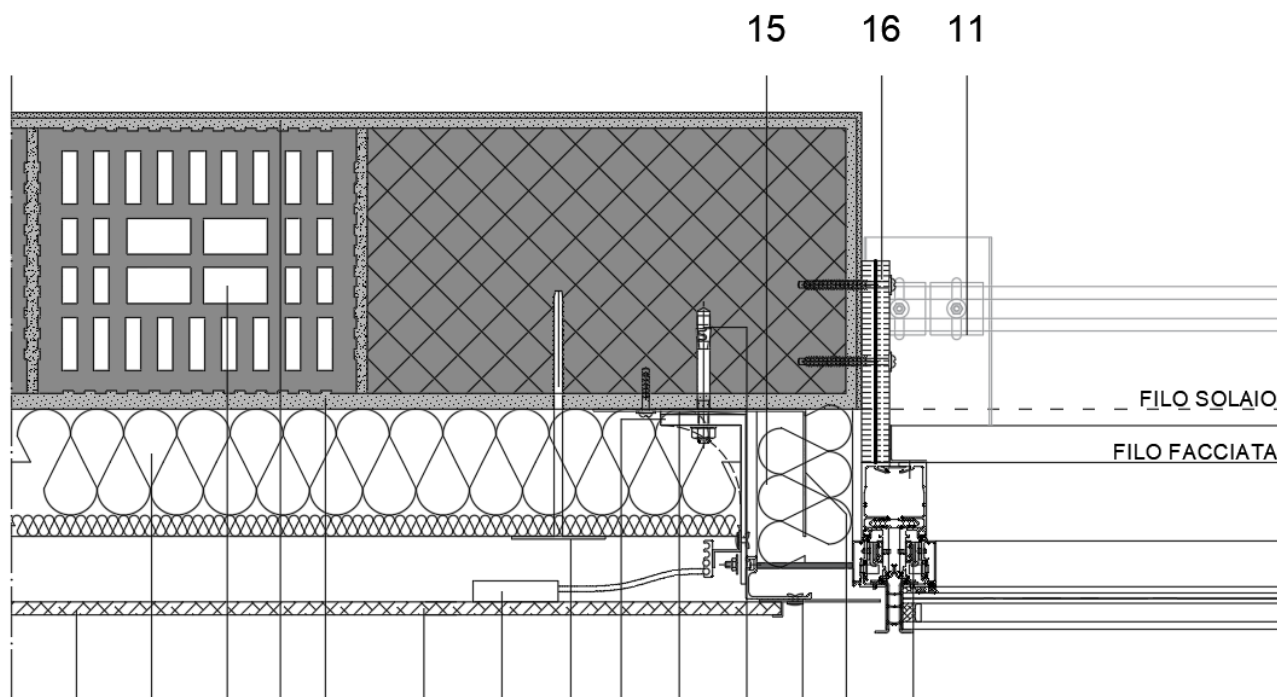


1. Muratura di tamponamento in blocchi alveolari
2. Intonaco di base e di finitura, sp. 1,5 cm
3. Intonaco di regolarizzazione in sabbia e cemento, sp. 1,5 cm
4. Ancoraggio di tipo chimico per murature in blocchi alveolari
5. Elemento di separazione staffa – muratura in neoprene, sp. 0,5 cm
6. Staffa in lega di alluminio pressofusa per controvento sottostruttura
7. Isolante in pannelli di lana di roccia a doppia densità con velo vetro, sp. 12 cm
8. Chiodi con rondella per fissaggio isolante
9. Sottostruttura reggilastra a montanti in lega di alluminio estruso
10. Lastra composita sottile di finitura in lana di roccia ad alta densità, sp. 0,8 cm
11. Rivetto di fissaggio in foro calibrato
12. Pannello fotovoltaico BIPV vetro-vetro con celle in silicio mono-cristallino
13. Connettori e cablaggi dell'impianto di generazione fotovoltaico
14. Staffa in acciaio zincato per il fissaggio della cavity barrier, introdotta per $\frac{3}{4}$
15. Elemento termo-espandente per compartimentare perimetralmente la facciata ventilata BIPV

Figura 128 – Sezione verticale corrente della facciata ventilata con compartimentazione perimetrale fra rivestimento composito e BIPV.

Il secondo tipo viene realizzato mediante due elementi: una doppia lastra in calcio silicato (EI 60) con interposto un lamierino metallico di 1 mm, per garantire la compartimentazione fino a filo facciata fra le due tipologie di involucro,

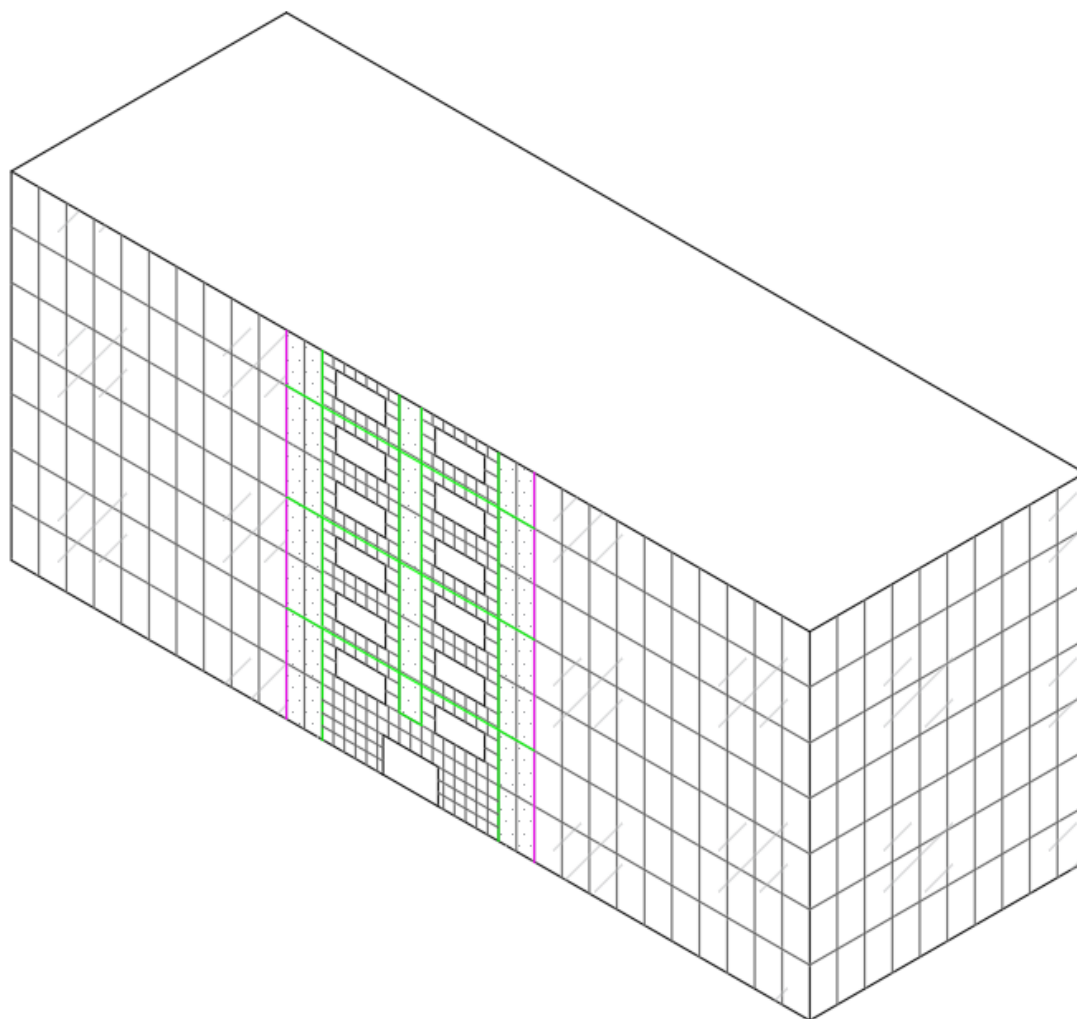
considerando l'esistenza del gap fra solaio e facciata della curtain wall a cellule, ed il materiale termo-espandente, utilizzato in orizzontale come cavity barrier, questa volta posizionato verticalmente per garantire la compartimentazione fino all'estradosso dell'intercapedine.



12 7 1 2 3 10 13 8 6 5 4 9 14 10

1. Muratura di tamponamento in blocchi alveolari
2. Intonaco di base e di finitura, sp. 1,5 cm
3. Intonaco di regolarizzazione in sabbia e cemento, sp. 1,5 cm
4. Ancoraggio di tipo meccanico per elementi in c.a.
5. Elemento di separazione staffa – muratura in neoprene, sp. 0,5 cm
6. Staffa in lega di alluminio pressofusa per controvento sottostruttura
7. Isolante in pannelli di lana di roccia a doppia densità con velo vetro, sp. 12 cm
8. Chiodi con rondella per fissaggio isolante
9. Sottostruttura reggilastra a montanti in lega di alluminio estruso
10. Facciata continua del tipo a cellula
11. Staffa in lega di alluminio per fissaggio cellula di facciata continua
12. Pannello fotovoltaico BIPV vetro-vetro con celle in silicio mono-cristallino
13. Connettori e cablaggi dell'impianto di generazione fotovoltaico
14. Staffa in acciaio zincato per il fissaggio della cavity barrier, introdotta per $\frac{3}{4}$
15. Elemento termo-espandente per compartimentare perimetralmente la facciata ventilata BIPV
16. Doppia lastra in calcio silicato con lamierino metallico intermedio per comp. fino a filo facciata

Figura 129 – Sezione orizzontale corrente con compartimentazione perimetrale fra facciata ventilata BIPV e facciata continua a cellule.



- UTILIZZO DI MATERIALE TERMOESPANDENTE COME CAVITY BARRIER E COME COMPARTIMENTAZIONE PERIMETRALE
- COMPARTIMENTAZIONE PERIMETRALE CON DOPPIA LASTRA IN CALCIO SILICATO E MATERIALE TERMOESPANDENTE

Figura 130 - Rappresentazione 3D dell'edificio del caso studio con gli interventi relativi alla facciata ventilata, comprendenti le barriere tagliafuoco di intercapedine e la compartimentazione perimetrale del sistema BIPV.

7.6 Indicazioni per edifici di categoria superiore alla A

Per quanto riguarda edifici appartenenti a categorie di classe superiore alla A, vale a dire con altezza antincendio maggiore di 24 m, come già detto, essi sono soggetti a controllo da parte dei VV.F. e devono essere progettati in modo da consentire una rapida e sicura evacuazione in caso d'incendio, seguendo la norma specifica D.M.16/05/1987 n° 246.

È evidente che, in questo caso, il rischio di incendio sarebbe più elevato, a causa del più consistente sviluppo in altezza dell'intercapedine ventilata, e quindi del maggiore impatto che avrebbe la propagazione delle fiamme lungo la facciata.

Relativamente al sistema costruttivo finito di facciata e alla rispettiva classe di reazione al fuoco, sarà ancora più cruciale la scelta di materiali incombustibili e che non permettano la propagazione dell'incendio in altezza, come ad esempio la scelta di un isolante di intercapedine di classe almeno A2-s3,d0.

Inoltre, è fondamentale prestare attenzione alla distanza in verticale fra le varie aperture di facciata allineate fra di loro, in modo tale da evitare assolutamente la possibilità che le fiamme in uscita da una finestra possano fare nuovamente ingresso nell'edificio mediante l'apertura direttamente superiore. Questo requisito viene soddisfatto, oltre che appunto mantenendo una sufficiente distanza di sicurezza, anche prevedendo delle barriere di apertura in corrispondenza dell'imbotte.

Per quanto riguarda l'aspetto relativo alle cavity barriers che vadano a compartimentare l'intercapedine ventilata, più è alto l'edificio più risulta adeguato realizzare tali barriere anche semplicemente mediante un lamierino metallico continuo fissato meccanicamente in pressione contro lo strato isolante, dal momento che, in questo caso, sarebbe più semplice andare a ricreare la ventilazione all'interno della cavità posizionando tali fasce orizzontalmente ogni 3/4 piani; in aggiunta, sarebbe opportuno prevedere un sistema di spegnimento automatico dell'intercapedine, con sprinkler in corrispondenza di ogni piano dell'edificio.

Data l'elevata altezza dell'edificio e il conseguente rischio di propagazione verticale delle fiamme, bisogna prevedere delle fasce orizzontali di sicurezza e

distanziamento che vadano a sezionare l'impianto FV presente in facciata in più settori, per evitare che vi sia continuità in verticale.

Infine, relativamente alla scelta della più adeguata tipologia di sistema RSS da utilizzare in caso di edifici alti, potrebbe risultare ottimale optare per un tipo di funzionamento a rilevazione automatica dell'incendio, mediante appositi dispositivi, piuttosto che un sistema con attivazione manuale tramite pulsante di sgancio, dal momento che, a causa dell'elevata altezza dell'edificio, potrebbe dimostrarsi più complesso identificare la presenza di un principio di incendio.

Conclusioni

Lo svolgimento di questo elaborato di tesi ha portato ad una completa analisi del comportamento in caso di incendio di diverse tipologie di facciata di edifici, in modo specifico di facciate ventilate con rivestimento in moduli BIPV, in cui la valutazione del rischio di incendio conclude che il livello di rischio viene incrementato principalmente dall'intercapedine ventilata e dalla presenza dell'impianto FV.

A tale riguardo si è potuto constatare che vi è una carenza di normative specifiche relative ai sistemi BIPV, e che manca un approccio normativo uniforme a livello europeo; ma, dal momento che tali sistemi FV integrati in involucro iniziano ad essere sempre più utilizzati, si prevedono miglioramenti in tal senso nei prossimi anni.

Allo stesso modo, è necessario elaborare una adeguata metodologia di test, specifica per questo tipo di sistema costruttivo e differente rispetto a quella utilizzata per eseguire prove sui moduli FV tradizionali, spesso a piccola scala.

Facendo poi riferimento ad un ipotetico edificio che presenta appunto una facciata ventilata BIPV, sono state elaborate delle linee guida, utili ai progettisti, andando ad approfondire tutti i relativi aspetti di rischio di incendio e presentando le rispettive misure di prevenzione, rappresentate graficamente mediante dettagli tecnici.

Tali linee guida hanno come scopo quello di garantire alla costruzione una sicurezza antincendio globale, ma si tiene in conto che la loro effettiva applicabilità dipende anche dal budget che si ha a disposizione.

Nello specifico, sono state proposte alcune distanze minime da rispettare per evitare la propagazione di fiamme e fumi, l'utilizzo di specifici materiali

incombustibili e certificati, vari approcci relativi al sezionamento e alla messa in sicurezza dell'impianto fotovoltaico, e diverse tipologie di compartimentazioni, come quella tradizionale di piano, quella di apertura, quella di intercapedine ("cavity barrier") e, infine, quella perimetrale che separa la porzione BIPV dal resto della facciata.

Indice delle figure

Figura 1 – Differenti meccanismi di propagazione di un incendio in facciata....	12
Figura 2 - Euroclassi di reazione al fuoco.....	15
Figura 3 - Classificazione aggiuntiva in relazione alla produzione di fumo.....	15
Figura 4 - Classificazione aggiuntiva in relazione alla formazione di gocce/particelle ardenti.....	15
Figura 5 – Fasi di progettazione per la sicurezza antincendio.....	20
Figura 6 - Fasi di sviluppo dell'incendio: curva temperatura-tempo.....	22
Figura 7 – Diverse tipologie di scenari di incendio.....	26
Figura 8 – Propagazione in facciata dell'incendio proveniente dall'interno.....	27
Figura 9 – Incendio che raggiunge la facciata mediante le aperture.....	27
Figura 10 – Utilizzo di fasce tagliafuoco in materiale isolante incombustibile attorno alle aperture di facciata.....	28
Figura 11 – Dettaglio costruttivo di una fascia tagliafuoco incombustibile sul lato superiore di un'apertura di facciata.....	29
Figura 12 – Dettaglio costruttivo di una fascia tagliafuoco attorno ad una apertura di facciata.....	29
Figura 13 – Fascia orizzontale continua incombustibile per interrompere l'isolamento combustibile.....	30
Figura 14 – Varie configurazioni di “pannello parafiamma” E 60 – ef.....	32
Figura 15 – Esempi di facciate ventilate. (FV-04).....	35
Figura 16 – Confronto fra diversi materiali isolanti.....	36

Figura 17 – Dettaglio costruttivo di una facciata ventilata che presenta una barriera antincendio in intercapedine, o interna o a sbalzo.	43
Figura 18 – Barriera tagliafuoco come nastro continuo attorno le aperture.....	44
Figura 19 - Barriera tagliafuoco fra finestra e zona del davanzale.	44
Figura 20 - Barriera tagliafuoco fra finestra e zona dell'architrave.	44
Figura 21 - Barriera tagliafuoco in corrispondenza di ogni piano.....	45
Figura 22 - Barriera tagliafuoco attorno ad ogni apertura.	45
Figura 23 – Valori di reazione al fuoco a seconda del tipo di isolante e dell'altezza dell'edificio.....	46
Figura 24 – Diverse configurazioni di posizionamento dei tasselli di fissaggio. .	49
Figura 25 – Pannello parafuoco per prevenire la propagazione dell'incendio da un compartimento all'altro.	49
Figura 26 – Due opzioni di valori di tenuta E di facciata.	50
Figura 27 – Sistema di spegnimento automatico con sprinkler.	50
Figura 28 – Alternativa orizzontale a sbalzo al pannello parafiamma verticale.	51
Figura 29 – Barriera tagliafuoco di intercapedine che interrompe anche l'isolante, se combustibile.	51
Figura 30 – Varie tipologie di barriere antincendio di intercapedine.	53
Figura 31 – Esempio di barriera tagliafuoco di intercapedine costituita da materiale termo-espandente.	54
Figura 32 – Valori di reazione al fuoco del rivestimento di facciata a seconda dell'altezza dell'edificio.	55

Figura 33 – Valori di reazione al fuoco dell’isolante a seconda dell’altezza dell’edificio.....	56
Figura 34 – Tabella con le soluzioni di isolamento termico più utilizzate in intercapedine, con relativi valori di reazione al fuoco.	57
Figura 35 – Barriera antincendio di intercapedine con tenuta E 30.	57
Figura 36 – Barriera di intercapedine non intumescente.....	58
Figura 37 – Barriera di intercapedine intumescente, con applicazione sopra di essa di uno strato incombustibile di 10 cm.....	58
Figura 38 – Tabella riassuntiva delle normative internazionali riguardanti la sicurezza al fuoco delle facciate ventilate.	64
Figura 39 – Esempio di barriera di intercapedine continua.	65
Figura 40 – Posizionamento di barriere di intercapedine a piani alternati.....	65
Figura 41 – Schema riassuntivo del caso studio, considerando due diversi tipi di barriere tagliafuoco, due tipologie differenti di isolamento termico, e tre spessori di intercapedine.	69
Figura 42 – Diverse soluzioni tecniche per barriere tagliafuoco di intercapedine.	72
Figura 43 – Funzionamento dell’intercapedine ventilata in presenza di barriere tagliafuoco ad espulsione automatica.	73
Figura 44 – Incendio lungo la facciata a cappotto, a Miskolc in Ungheria.....	74
Figura 45 – Propagazione dell’incendio lungo la facciata, a Dijon in Francia. ...	75
Figura 46 – Propagazione dell’incendio nel Centro Televisivo Culturale di Beijing.	76

Figura 47 – Diffusione delle fiamme dal tetto fino in facciata, a Zagreb.	77
Figura 48 – Schema esplicativo delle tre diverse generazioni delle celle solari.	81
Figura 49 – Elementi che compongono un impianto FV.	82
Figura 50 – Funzionamento di un impianto FV.	83
Figura 51 – Funzionamento di un impianto FV con quadro di campo.	83
Figura 52 – Esempio di incendio di parte di impianto FV in copertura.	87
Figura 53 – Allegati della 3.1.2 Nota prot. n. 6334 del 4 maggio 2012	94
Figura 54 – Caratteristiche di tre diversi tipi di backsheet in commercio.	100
Figura 55 – Caratteristiche di quattro diversi tipi di backsheet.	101
Figura 56 – Funzionamento dell’impianto FV con dispositivi di emergenza.	107
Figura 57 - Indicazioni riguardo le operazioni dei Vigili del Fuoco secondo le linee guida dell’Associazione VV.F. Tedesca.	109
Figura 58 – Composizione di un modulo FV.	110
Figura 59 – Ossidazione interna a bava di lumaca.	112
Figura 60 – Cortocircuito generato da perdita di integrità del telaio a causa dell’acqua piovana.	112
Figura 61 – Inserimento di diodi per minimizzare l’effetto camino.	116
Figura 62 – Campioni sezionati dall’intero modulo, in modo tale da considerarne il comportamento anisotropo.	121
Figura 63 – Configurazione degli elementi per la realizzazione della prova di reazione al fuoco.	122
Figura 64 – Layers costituenti un pannello FV.	132

Figura 65 – Caso di diffusione di un incendio al compartimento inferiore mediante lucernario.....	133
Figura 66 – BIPV in copertura ed in facciata.	140
Figura 67 – Grafici a torta rappresentativi dei vari utilizzi dei sistemi BIPV. ...	142
Figura 68 – Tabella esplicativa riguardante i test di sicurezza antincendio.	148
Figura 69 – Diverse tipologie di prodotti BIPV in commercio.....	151
Figura 70 – Modulo FV non accessibile dall'interno dell'edificio.	152
Figura 71 – Modulo FV accessibile dall'interno dell'edificio.	152
Figura 72 – Dettaglio costruttivo di facciata ventilata BIPV.	153
Figura 73 – Caso reale di facciata ventilata con rivestimento costituito da moduli BIPV.....	154
Figura 74 – Funzionamento energetico di una facciata ventilata BIPV.	155
Figura 75 – Attuatore soft-pneumatico.	157
Figura 76 – Componenti che costituiscono un sistema BIPV.....	157
Figura 77 – Integrazione in facciata di pannelli con diverse inclinazioni.	158
Figura 78 – Grafico riguardante i requisiti relativi ai sistemi BIPV.....	159
Figura 79 – Casi di incendio registrati in Italia in presenza di impianti FV.	160
Figura 80 – Test effettuati su porzioni di facciata ricreate mediante moduli FV.	168
Figura 81 – Schema della porzione di facciata da testare.	172
Figura 82 - Temperature misurate in prossimità del backsheet dei moduli. ...	173

Figura 83 - Potenziale elettrico (tensione) misurato fra i morsetti esterni dei moduli FV.	173
Figura 84 – Rappresentazione della curva del rischio.	178
Figura 85 – Valori delle scale di probabilità e magnitudo.	186
Figura 86 – Matrici probabilità – magnitudo.	187
Figura 87 – Livelli di rischio.....	188
Figura 88 – Tre scenari di incendio più tipici.....	189
Figura 89 - Incendio in un appartamento che raggiunge la facciata dalla finestra e può estendersi ad altri appartamenti.	191
Figura 90 - Incendio in un compartimento che raggiunge la facciata dalla finestra e può estendersi ad un altro compartimento adiacente attraverso la facciata.	191
Figura 91 - Incendio in un compartimento che raggiunge la facciata dalla finestra e può estendersi ad un altro piano, che costituisce altro compartimento antincendio, attraverso la facciata.	191
Figura 92 - Incendio in un appartamento che raggiunge la facciata dalla finestra e può estendersi alla copertura.....	192
Figura 93 - Incendio su terrazzo/balcone.	193
Figura 94 - Incendio all'interno dell'edificio adiacente che fuoriesce da un'apertura e interessa la facciata combustibile dell'edificio in questione. ...	193
Figura 95 – Tabelle riguardanti le caratteristiche prevalenti degli occupanti e la velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio.....	195
Figura 96 – Tabella riguardante le caratteristiche degli occupanti.	196

Figura 97 – Tabella riguardante la densità di carico di incendio da UNI EN 1991-1-2.....	197
Figura 98 – Tabella riportante il quadro generale di parametri, sulla base di quanto proposto dall’NFPA.	199
Figura 99 – Lista di parametri che influiscono sul rischio di incendio.	202
Figura 100 – Classificazione del livello di rischio a seconda del CLT.	203
Figura 101 – Metodo di calcolo del <i>CLPFV</i>	204
Figura 102 – Compartimentazione interna orizzontale di piano e verticale. ...	209
Figura 103 – Propagazione in facciata di un incendio proveniente dall’interno.	209
Figura 104 – Compartimentazione attorno alle aperture di facciata.	211
Figura 105 – Esempio di pannello parafiamma.....	212
Figura 106 – Sistema di facciata ventilata con cavity barrier costituita da un lamierino continuo metallico fissato meccanicamente e in pressione contro l’isolante.....	213
Figura 107 – Sistema di facciata ventilata con cavity barrier che interrompe sia l’intercapedine ventilata che lo strato di isolamento combustibile.	215
Figura 108 – Classificazione secondo l’altezza antincendio in edifici civili	219
Figura 109 – Rappresentazione schematica dell’edificio del caso studio con i diversi tipi di facciata utilizzati.....	220
Figura 110 – Rappresentazione 3D dell’edificio del caso studio con moduli BIPV e lastre di rivestimento della facciata ventilata.	221

Figura 111 – Rappresentazione schematica dell’edificio del caso studio con la compartimentazione orizzontale di piano.	222
Figura 112 – Rappresentazione 3D dell’edificio del caso studio con compartimentazioni orizzontali di piano e di aperture di facciata.	223
Figura 113 – Caratteristiche tecniche del modulo BIPV vetro-vetro con celle in silicio mono-cristallino.	225
Figura 114 - Sezione orizzontale corrente della facciata ventilata con integrazione di modulo BIPV.	226
Figura 115 - Sezione verticale corrente della facciata ventilata con integrazione di modulo BIPV.	227
Figura 116 – Esempio di facciata ventilata con sistema di rivestimento BIPV, con finitura opaca oscurata per nascondere le celle.	228
Figura 117 - Sezione orizzontale corrente della facciata ventilata con rivestimento in lastra composita sottile.	229
Figura 118 – Rappresentazione schematica dell’edificio del caso studio con le barriere tagliafuoco di apertura.	230
Figura 119 - Dettaglio costruttivo soletta-parete di facciata in sezione verticale.	231
Figura 120 - Disposizione dell’elemento isolante e della barriera antincendio all’interno dell’intercapedine ventilata.	232
Figura 121 – Staffe in acciaio zincato per il fissaggio delle cavity barriers termo-espandenti.	233
Figura 122 – Viti a spirale per la protezione della fascia anteriore termo-espandente.	233

Figura 123 – Fissaggio meccanico delle cavity barriers termo-espandenti.	234
Figura 124 - Dettaglio costruttivo soletta-parete di facciata con cavity barrier termo-espandente in sezione verticale.	235
Figura 125 – Rappresentazione schematica dell’edificio del caso studio con le cavity barriers.	235
Figura 126 – Rappresentazione schematica dell’edificio del caso studio con la compartimentazione perimetrale fra il sistema BIPV ed il resto della facciata.	238
Figura 127 – Sezione orizzontale corrente della facciata ventilata con compartimentazione perimetrale fra rivestimento composito e BIPV.....	239
Figura 128 – Sezione verticale corrente della facciata ventilata con compartimentazione perimetrale fra rivestimento composito e BIPV.....	240
Figura 129 – Sezione orizzontale corrente con compartimentazione perimetrale fra facciata ventilata BIPV e facciata continua a cellule.	241
Figura 130 - Rappresentazione 3D dell’edificio del caso studio con gli interventi relativi alla facciata ventilata, comprendenti le barriere tagliafuoco di intercapedine e la compartimentazione perimetrale del sistema BIPV.	242

Riferimenti bibliografici

- E. S. Mazzucchelli, A. Lucchini e A. Stefanazzi, “Fire safety issues in high-rise building façades”, TEMA Technologies Engineering Materials Architecture, 2019;
- M. J. Rukavina, M. Carević e I. B. Pečur, “SICUREZZA ANTINCENDIO DELLE FACCIATE NEGLI EDIFICI Manuale per progettisti, architetti, ingegneri ed esperti di fuoco”, Zagabria, Croazia: Università di Zagabria, Facoltà di Ingegneria Civile, 2017;
- Allegato 5043 - “Guida per la determinazione dei ‘Requisiti di sicurezza antincendio delle facciate negli edifici civili’”, Ministero dell’Interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile;
- Y. Nishio, H. Yoshioka, T. Noguchi, T. Ando e M. Tamura, “Experimental study on fire propagation over combustible exterior facades in Japan”, MATEC Web of Conferences 9, 2013;
- L. Mazziotti e P. Cancelliere, “The Italian National Guidelines for the fire safety of facades”, MATEC Web of Conferences 9, 2013;
- “Codice di prevenzione incendi”, [Online], Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Codice_di_prevenzione_incendi;
- E. S. Mazzucchelli, A. Lucchini e A. Stefanazzi, “Materiali ed elementi costruttivi per il futuro”, 2016;
- A. Barabash, E. Naumova, O. Zhuvak, D. Nemova, e V. Olshevskiy, “The Efficiency of the Ventilated Gap of the Double-Skin Facade Systems Using Fire Crosscuts”, MATEC Web of Conferences 73, 2016;
- N. Zhaopeng, “Experimental study on fire performance of double-skin glass facades”, Journal of Fire Sciences, 2012;
- D. Bikasa, K. Tsikaloudakia, K.J. Kontoleona, C. Giarmaa, S. Tsokaa e D. Tsirigotia, “Ventilated Facades: Requirements and Specifications Across Europe”, International Conference on Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale, 2017;
- M. P. Giraldo, A. Lacasta, J. Avellaneda e C. Burgos, “Computer-simulation study on fire behaviour in the ventilated cavity of ventilated façade systems”, MATEC Web of Conferences 9, 2013;

- H. Dragne, A. Simion e D. Stoica, “Experimental Research on the Behaviour of the Systems for Ventilated Facades, Exposed to the Fire Action”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020;
- Z. Nagyn, B. Svetozarevic, P. Jayathissa, M. Begle, J. Hofer, G. Lydon, A. Willmann e A. Schlueter, “The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes”, Frontiers of Architectural Research, 2016;
- C. P. Lopez, F. Frontini, P. Bonomo e A. Scognamiglio, “PV AND FAÇADE SYSTEMS FOR THE BUILDING SKIN. ANALYSIS OF DESIGN EFFECTIVENESS AND TECHNOLOGICAL FEATURES”, 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2014;
- L. Mazziotti, P. Cancelliere, G. Paduano, P. Setti e S. Sassi, “Fire risk related to the use of PV systems in building facades”, MATEC Web of Conferences 46, 2016;
- L. Miao e C. Chow, “Investigation of burning photovoltaic panels on a double-skin facade with ejecting flame from an adjacent room fire”, Indoor and Built Environment, 2018;
- N. Martín-Chivelet, J. C. Gutiérrez, M. Alonso-Abella, F. Chenlo e J. Cuenca, “Building Retrofit with Photovoltaics: Construction and Performance of a BIPV Ventilated Façade”, MDPI, 2018;
- A. Kumar Shuklaa, K. Sudhakara e P. Baredar, “Recent advancement in BIPV product technologies: A review”, Energy and Buildings, 2017;
- A. Kumar Shuklaa, K. Sudhakara e P. Baredar, “A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system”, Energy and Buildings, 2016;
- F. Parolini, P. Bonomo, F. Frontini, M. Caccivio, G. Manzini, G. Traina e P. Cancelliere, “FIRE PERFORMANCE ASSESSMENT OF BIPV FAÇADES EQUIPPED WITH ACTIVE RAPID SHUTDOWN”, 2018;
- P. Rigone, E. S. Mazzucchelli, P. Giussani e M. Alston, “Architectural integration of photovoltaics in high-rise office buildings: A case study in Milan”, 15th Conference on Advanced Building Skins, 2020;
- IEA PVPS, M. Del Buono, K. A. Berger e F. Frontini, “Multifunctional Characterisation of BIPV”, Technology Collaboration Programme, 2020;
- S. Fontana, F. Notaro, L. Podestà, G. Longobardo, A. De Rosa e P. Cancelliere, “ANALISI DELLA REAZIONE AL FUOCO DI PANNELLI FOTOVOLTAICI”;

- G. Demontis e F. Contini, “Comportamento dei pannelli fotovoltaici in caso di incendio”, 2015;
- G. Zhao, M. Li, L. Jian, Z. He, J. Shuang, S. Yuping, Q. Zhang, and L. Zhongxian, “Analysis of Fire Risk Associated with Photovoltaic Power Generation System”, Hindawi, 2018;
- V. Rossi, “STATO DELL’ARTE DEI TEST AL FUOCO SU PANNELLI FOTOVOLTAICI: UNA LITERATURE REVIEW”, Relazione finale di laurea, Politecnico di Milano, 2019;
- C. L. Chow, S. S. Han e X. M. Ni, “A study on fire behaviour of combustible components of two commonly used photovoltaic panels”, Fire and Materials, 2017;
- Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, “Relazione tecnica sugli incendi coinvolgenti impianti fotovoltaici”, Nucleo investigativo antincendio, Capannelle – Roma;
- H. Y. Yang, X. D. Zhou, L. Z. Yang e T. L. Zhang, “Experimental Studies on the Flammability and Fire Hazards of Photovoltaic Modules, Materials, 2015;
- P. Cancelliere, “PV electrical plants fire risk assessment and mitigation according to the Italian national fire services guidelines”, Fire and Materials, 2016;
- J. A. Guerra, “Fire Safety in Building-Mounted photovoltaic arrays”, Seguridad y Medio Ambiente, 2014;
- G. Manzini, P. Gramazio, S. Guastella, C. Liciotti e G. L. Baffoni, “The fire risk in photovoltaic installations - Test protocols for fire behavior of PV modules”, ATI 2015 - 70th Conference of the ATI Engineering Association, 2015;
- G. Manzini, P. Gramazio, S. Guastella, C. Liciotti e G. L. Baffoni, “The fire risk in photovoltaic installations - Checking the PV modules safety in case of fire”, ATI 2014 - 69th Conference of the ATI Engineering Association, 2014;
- J. Johnson, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, “Arc-fault Protection in PV Installations: Ensuring PV Safety and Bankability”, World Renewable Energy Forum, 2012;
- M. Malizia, “IMPIANTI FOTOVOLTAICI - NORMATIVA DI PREVENZIONE INCENDI”, Raccolta delle principali disposizioni concernenti la prevenzione incendi e gli impianti fotovoltaici coordinati con chiarimenti e commenti a cura dell’autore;

- “Nota DCPREV prot n. 1324 del 7 febbraio 2012 - Guida per l'installazione degli impianti fotovoltaici”, Ministero dell’Interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile, 2012;
- “Nota prot. n. 6334 del 4 maggio 2012 - Chiarimenti alla nota prot DCPREV 1324 de 7/2/2012 ‘Guida per l'installazione degli impianti fotovoltaici’”, Ministero dell’Interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile, 2012;
- “Nota prot. EM 622/867 del 18/02/2011 - Procedure in caso di intervento in presenza di pannelli fotovoltaici e sicurezza degli operatori vigili del fuoco”, 2011;
- M. Carcassi e N. Marotta, “Criteri di verifica del rischio incendio”;
- “Valutazione rischio incendio”, [Online]
Available: <http://www.studiocz.eu/files/Valutazione-rischio-incendio-CZ-FRIM---Full---OK.pdf>
- S. Lamont e S. Ingolfsson, “High Rise Buildings with Combustible Exterior Wall Assemblies: Fire Risk Assessment Tool”, NFPA National Fire Protection Association Research, 2018;
- P. Canzani, “IL RISCHIO INCENDIO IN EDIFICI CON FACCIATA TERMO-ISOLATA A CAPPOTTO”, Relazione finale id laurea, Politecnico di Milano, 2018;
- “Antincendio Italia”, [Online], 2017,
Available: <https://antincendioitalia.wordpress.com/2017/02/06/teoria-del-fuoco1-la-curva-dincendio/>
- L. Mazziotti, “Incendi esterni delle facciate – Il rischio di propagazione”;
- Y.Martin, S. Eeckhout, L. Lassoie, E. Winnepeninckx e B. Deschoolmeester, “Fire safety of multi-storey building facades”, BBRI Belgium Building Research Institute, 2017;
- “Documento Básico SI – Seguridad en caso de incendio”, Ministerio de Fomento, 2019;
- “Brandschutz bei hinterlüfteten Fassaden”, ÖFHF Österreichischer Fachverband für hinterlüftete Fassaden, 2018.

Ringraziamenti

In primo luogo, ringrazio il professor Angelo Lucchini per la fiducia accordatami accettando il ruolo di Relatore e per tutte le conoscenze che mi ha trasmesso durante il percorso universitario.

Un ringraziamento particolare va al professor Enrico Sergio Mazzucchelli per avermi fornito l'opportunità di sviluppare questa interessante tematica come argomento per il mio lavoro di tesi, per avermi seguita costantemente durante tutto questo percorso e per essere stato così disponibile da mettermi in contatto con professionisti del settore.

Ringrazio la professoressa María Jesús Albarreal Nuñez, docente della Università di Siviglia, per la sua disponibilità nel fornirmi materiale utile ed esempi interessanti che mi hanno permesso di approfondire alcuni aspetti da un punto di vista multidisciplinare.

Un ringraziamento va inoltre all'ing. Paolo Canzani di FSC Engineering Srl, all'ing. Marija Jelčić Rukavina della facoltà di Ingegneria Civile dell'Università di Zagabria, e agli ing. Fabio Parolini e Pierluigi Bonomo di SUPSI, per avermi permesso di accrescere le mie conoscenze mediante colloqui di approfondimento in ambito più professionale.

Ringrazio la mia famiglia, mamma, papà e mia sorella Giulia, per essermi sempre stati accanto durante questi anni, anche nei momenti di maggiore confusione e debolezza, accompagnandomi mano nella mano anche se fisicamente distanti.

Infine, ma non da ultimo, ringrazio tutti i miei amici, in particolare Maui e Roberta con cui ho passato questi ultimi mesi di stesura della tesi, e Giorgia con cui ho condiviso la mia vita universitaria milanese, per il loro sostegno morale e per non aver mai smesso di credere in me.