

DICHIARAZIONE SOSTITUTIVA DELL'ATTO DI NOTORIETA'

(ai sensi dell'art. 47 D.P.R. 28/12/2000, n. 445)

Per attribuzioni dei contributi degli autori all'interno delle pubblicazioni scientifiche

Il sottoscritto, consapevole che chiunque rilascia dichiarazioni mendaci è punito ai sensi del Codice penale e delle leggi speciali in materia, ai sensi e per gli effetti dell'Art. 76 del DPR del 28/12/2000, nonché della sanzione ulteriore prevista dall'art. 75 del citato DPR 445 del 28/12/2000, consistente nella decadenza dai benefici eventualmente conseguenti al provvedimento emanato sulla base della dichiarazione non veritiera, in riferimento all'articolo scientifico:

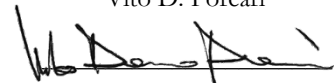
Titolo: FACCIATE VENTILATE: Sistemi di rivestimento a parete ventilata sottoposti a carico d'incendio: proposta di una metodologia di calcolo e verifica agli elementi. In: "MODULO" n. 453 - rivista scientifica – area 08/C1 ANVUR, pp. 88-97, ISSN 0390-1025, Editore: Milano: BE MA Editrice

Autori: Davide Vairo (D.V.), Enrico S. Mazzucchelli (E.S.M.), Angelo Lucchini (A.L), Vito D. Porcari (V.D.M.)

DICHIARA

Che il contributo del candidato Vito D. Porcari è da riferirsi alla ricerca dei dati tecnici e costruttivi, all'esecuzione operativa del lavoro, allo sviluppo dello studio ed alla redazione del testo in parti uguali agli altri coautori.

Vito D. Porcari



FACCIAE VENTILATE

Sistemi di rivestimento a parete ventilata sottoposti a carico d'incendio: proposta di una metodologia di calcolo e verifica agli elementi finiti

a cura di **Davide Vairo***, **Enrico S. Mazzucchelli***, **Angelo Lucchini***, **Vito D. Porcari****

* Politecnico di Milano, Dip. ABC

**Università degli Studi della Basilicata, Dip. DiUSS

La necessità di rispettare le sempre più stringenti normative in merito all'efficienza energetica degli edifici ha portato alla ricerca e alla progettazione di involucri edilizi in cui vengono utilizzati materiali e sistemi sempre più innovativi. Tuttavia, la qualità architettonica e le prestazioni energetiche di un sistema di facciata devono essere conformi e coerenti anche al fine di garantire una adeguata sicurezza antincendio delle soluzioni di involucro edilizio. Molti recenti eventi hanno dimostrato la necessità di migliorare le conoscenze tecniche e le procedure pratiche nella progettazione dei sistemi di facciata degli edifici, in particolare quelli riguardanti la vulnerabilità al fuoco. Tra i casi più significativi si ricordano l'incendio della Grenfell Tower a Londra, che nell'estate del 2017 ha causato oltre settanta vittime, quello della Torre dei Moro a Milano, che nel 2021, seppur senza aver provocato vittime, ha segnato un ricordo

indelebile nell'opinione pubblica, e il più recente a Valencia nel febbraio 2024. Purtroppo, gli eventi appena citati non sono casi isolati, essendo molteplici gli incendi che hanno interessato facciate di edifici negli ultimi decenni, con una tendenza in crescita. Tra i sistemi di rivestimento, il comportamento in caso d'incendio di quelli a parete ventilata è stato più volte oggetto di dibattito, sia per la possibile veloce propagazione di fiamme e fumo per effetto camino nell'intercapedine tra rivestimento esterno ed isolante termico, sia per la definizione della reazione al fuoco dei materiali impiegati nella sua costruzione.

La causa di questi eventi può derivare dalla scelta non consapevole di materiali da costruzione in interventi di efficientamento energetico o di riqualificazione estetico-architettonica dell'involucro. L'effetto mediatico e la frequenza di questi eventi hanno posto in luce la necessi-

tà di una rivalutazione della normativa di riferimento, che in Italia ha condotto al D.M. del 30 marzo 2022, noto come RTV13 di cui si ricordano sinteticamente le finalità:

- limitare la propagazione attraverso la facciata di un incendio che si è originato all'interno o all'esterno dell'edificio;
- evitare che la caduta al suolo di porzioni o elementi di facciata possa compromettere l'incolumità e la sicurezza di persone e squadre di soccorso.

Se per l'ottenimento del primo dei due requisiti è fondamentale che i materiali siano caratterizzati da una buona reazione al fuoco, ovvero che non contribuiscano in modo attivo all'incendio, per il secondo è invece fondamentale considerare la resistenza al fuoco complessiva del sistema di facciata, ovvero la capacità di mantenere inalterata la propria integrità in caso d'incendio. Il decreto definisce in modo chiaro le caratteristiche di reazione al fuoco dei materiali per le diverse componenti d'involucro, in funzione della destinazione d'uso e della geometria dell'edificio, mentre per la resistenza si fa rimando a metodi di prova sperimentali, senza tuttavia indicarne uno specifico per i sistemi a parete ventilata, non essendone ancora disponibile uno armonizzato a livello europeo. Vale, inoltre, l'obbligo di compartimentare ad ogni piano l'intercapedine, così da interrompere la continuità, impedendo la formazione di un significativo effetto camino e la conseguente propagazione in verticale e orizzontale di fiamme e fumi caldi.

L'obiettivo della ricerca di seguito descritta è stato quello di indagare il comportamento meccanico di sistemi a parete ventilata sottoposti a carico d'incendio, così da valutare l'influenza della temperatura sulle proprietà dei componenti del sistema di facciata e le ripercussioni delle dilatazioni termiche sulla stabilità della facciata stessa. A tal riguardo, si sono prese in esame cinque possibili configurazioni, rappresentative delle soluzioni più comunemente utilizzate in edilizia. Le analisi sono state condotte avvalendosi di software agli elementi finiti, allineandosi il più possibile con i riferimenti normativi del panorama italiano ed europeo. L'analisi della letteratura scientifica ha permesso di riscontrare una significativa mancanza di conoscenza sul tema del comportamento meccanico di pareti ventilate in caso d'incendio, pur trattandosi di un aspetto assai rilevante per quanto attiene la sicurezza.

Come configurazione n.1 si è analizzata una parete ventilata con rivestimento in gres porcellanato, sostenuto da una sottostruttura in alluminio con profili a T mediante apposite clip reggilastra in acciaio inossidabile. I montanti sono vincolati in sommità con una staffa apposita (che funge da punto fisso) e controventati con staffe interme-

die dotate di fori asolati, che permettono di assecondare le dilatazioni termiche ordinarie. La configurazione n. 2 è simile alla precedente, ma le dilatazioni termiche vengono gestite con una scanalatura continua a tutta altezza, estrusa direttamente nel profilo. Per le altre configurazioni si è considerato il caso di un rivestimento lapideo, vincolato con apposito sistema reggilastra inserito nella fresatura kerf sulla costa delle lastre stesse. I montanti, aventi sezione a C, sono provvisti di fori asolati per la gestione delle dilatazioni termiche e realizzati in alluminio per la configurazione n. 3, e in acciaio al carbonio e acciaio inossidabile rispettivamente per le configurazioni n. 4 e n. 5.

Le analisi sono state condotte seguendo la procedura indicata nella EN 1991-1-2:2002 che prevede:

- definizione di un incendio di progetto;
- analisi termica a livello globale e di sezione;



Figura 1 - Esempio di propagazione incendio in facciata (Valencia, 2024).



Figura 2 - Facciata della Torre dei Moro dopo l'incendio.

- analisi meccanica e verifiche di sicurezza.

Per la definizione dell'incendio di progetto, e quindi delle temperature da esso derivanti, in normativa sono disponibili diversi metodi: in prima istanza si segnala la curva d'incendio esterna, che tuttavia è apparsa limitante per la ricerca qui illustrata dal momento che esprime una temperatura uniforme su tutto il piano di facciata e non tiene in considerazione il gradiente termico in funzione dell'altezza di fiamma. Nell'Eurocodice 1 è proposto un differente metodo per la valutazione del comportamento delle strutture esterne esposte al fuoco e che restituisce un profilo di temperatura variabile in funzione dell'altezza di fiamma (ma in regime stazionario, quindi senza alcuna indicazione in merito all'evoluzione nel tempo). Per ovviare a queste evidenti limitazioni, si è fatto ricorso a dati sperimentali ottenuti in occasione di prove di certificazione di soluzioni a parete ventilata condotte secondo il metodo NFPA 285 "Standard Fire Test Method for Evaluation of Fire Propagation Characteristics of Exterior Wall Assemblies Containing Combustible Components", uno standard internazionale di derivazione statunitense. Il test valuta il comportamento al fuoco delle soluzioni d'involucro simulando un incendio che, fuoriuscendo da una finestra, inizi a lambire la facciata, monitorando le temperature raggiunte sul fronte interno ed esterno del rivestimento con apposite termocoppie. Per eseguire l'analisi termica, si è deciso di considerare come incendio di progetto la curva esterna proposta dalla normativa, scalandone però i valori

in funzione dell'altezza di fiamma, in analogia con quanto riscontrato nei risultati dei test sperimentali. Le curve così ottenute sono state utilizzate per eseguire delle analisi agli elementi finiti sulle differenti configurazioni di facciata in modo da calcolare l'evoluzione della temperatura nei diversi elementi del sistema durante trenta minuti (considerati come intervallo di riferimento), tenendo debitamente conto degli scambi convettivi e radiativi tra le diverse componenti, le fiamme e i fumi caldi. Per le configurazioni n. 1 e n. 2, dopo trenta minuti di incendio, la temperatura alla base del montante si attesta sui 680°C, situazione estremamente critica per un profilo in alluminio, mentre per le configurazioni n. 3, n. 4 e n. 5, data l'inerzia termica del rivestimento pesante, la temperatura nei montanti oscilla tra i 100°C in sommità ed i 400°C alla base.

Le temperature indicate non sono interessanti in quanto tali, ma lo sono per i loro effetti sulle strutture metalliche, in particolare per il decadimento delle proprietà meccaniche del materiale e per la dilatazione termica dei profili. L'alluminio è molto suscettibile a questi fenomeni, dato che le sue proprietà meccaniche peggiorano rapidamente all'aumentare della temperatura, sia per quanto riguarda la tensione di snervamento, sia per quanto attiene al modulo elastico, non essendo più idoneo ad assolvere alla sua funzione strutturale una volta raggiunte temperature oltre i 550°C. Il comportamento dell'acciaio è migliore rispetto all'alluminio, dal momento che la tensione di snervamento si mantiene



Figura 3 - Esempio di compartimentazione dell'intercapedine di una facciata ventilata (fonte: www.promat.it).



Figura 4 - Geometria delle differenti configurazioni analizzate (fonte: Aderma Locatelli).

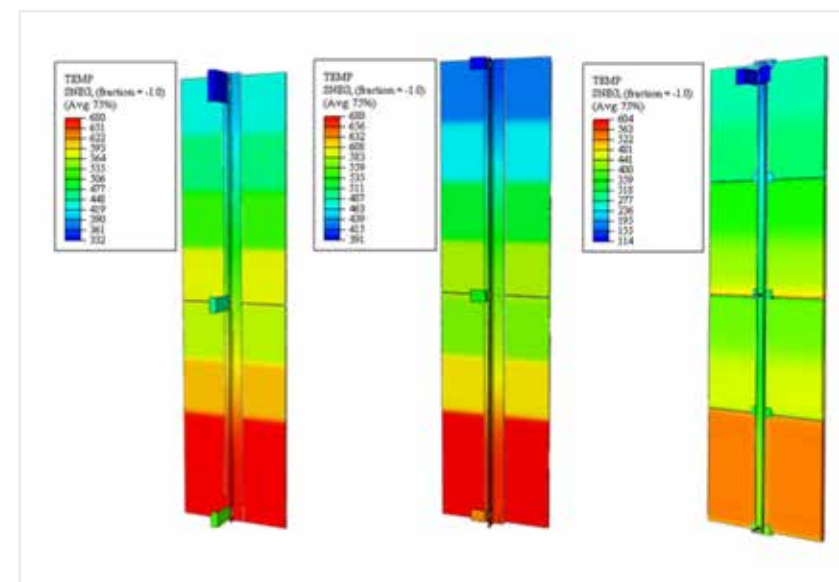


Figura 5 - Temperature raggiunte dopo trenta minuti di esposizione all'incendio per le differenti configurazioni (vista dall'interno).

costante fino a 400°C per poi decadere progressivamente (il suo coefficiente di dilatazione termica lineare è circa la metà di quello dell'alluminio). Ancora meglio si comporta l'acciaio inossidabile, che in alcune applicazioni speciali viene selezionato esclusivamente per il suo comportamento al fuoco. I montanti delle pareti ventilate sono progettati per lavorare a trazione, essendo vincolati alla staffa sommitale con un vincolo a cerniera (ottenuto mediante un bullone inserito in un foro circolare), mentre le staffe inferiori, si comportano come carrelli, essendo dotate di fori asolati che permettono di compensare l'allungamento e l'accorciamento del profilo in funzione delle variazioni di temperatura. Considerate le elevate temperature raggiunte negli scenari analizzati, le dilatazioni termiche sono talmente rilevanti da raggiungere in pochi minuti le tolleranze previste, alterando in tal modo lo schema statico di partenza. Infatti, si passa da uno schema cerniera-carrello, isostatico, ad uno schema cerniera-cerniera, iperstatico, con i profili non più soggetti a trazione bensì a compressione, divenendo suscettibili a fenomeni di instabilità in virtù della loro snellezza. Per la configurazione n. 1, dopo soli 6 minuti di esposizione all'incendio, le dilatazioni termiche compensano le tolleranze del foro asolato, alterando lo schema statico, ed il montante inizia sin da subito a manifestare gli effetti dell'instabilità, imbozzandosi significativamente dopo 9 minuti. L'allungamento del profilo dovuto alle dilatazioni termiche fa sì che le lastre inferiori tendano a scorrere verso il basso e sfuggire al vincolo antiribaltamento

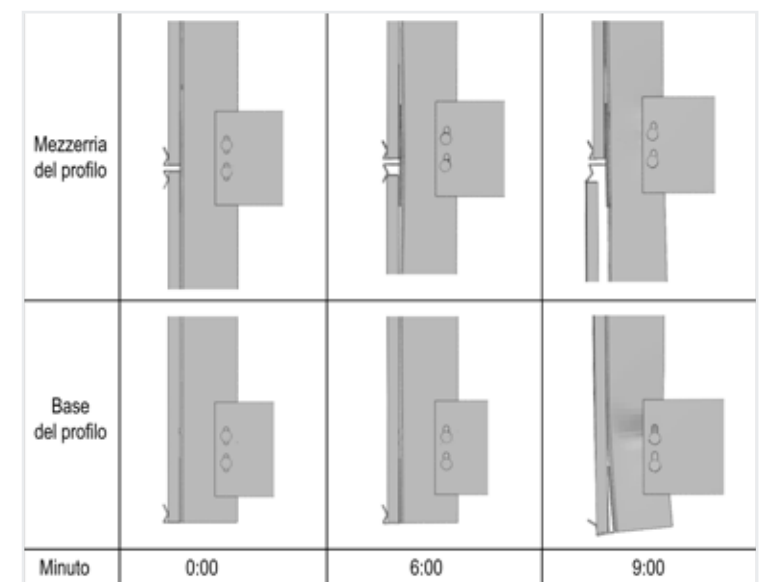


Figura 6 - Effetto delle dilatazioni termiche in mezzeria e alla base del profilo per la configurazione n.1

della clip reggi-lastra, giungendo in condizione di collasso incipiente dopo soli 15 minuti. È opportuno notare che le clip reggi-lastra, seppur direttamente lambite dalle fiamme, dimostrano in realtà un ottimo comportamento meccanico, essendo realizzate in acciaio inossidabile. Dopo soli 22 minuti il profilo ha raggiunto temperature talmente elevate da superare il punto di fusione del materiale.

La configurazione n. 2, caratterizzata da un'isolatura continua a tutt'altezza, sarebbe teoricamente in grado di assecondare dilatazioni termiche di qualsiasi entità senza alterare lo schema statico; tuttavia, l'ingranamento tra la testa del bullone e l'interno della guida fa sì che anche in questo caso il profilo inizi a lavorare a compressione, divenendo instabile dopo 9 minuti. La maggior libertà di sfogo delle dilatazioni termiche, da un lato ritarda l'instabilità del profilo, dall'altra fa sì che non solo la lastra inferiore possa sfuggire al vincolo antiribaltamento offerto dalle clip, bensì anche la lastra superiore tenda a sfilarsi dopo 21 minuti.

Per quanto concerne le soluzioni con rivestimento lapideo pesante, si nota un comportamento differente: a causa del gradiente termico la lastra tende a imbozzarsi verso l'esterno, specialmente nella sua zona centrale, restando invece trattenuta agli angoli dal sistema reggi-lastra. La presenza del vincolo genera sulla costa del rivestimento una concentrazione di sforzi di tipo flessionale che, data la modesta capacità di resistenza a trazione e a flessione dei materiali lapidei, porta all'apertura di alcune piccole fessure che tendono a

procedere dal lembo teso verso il lembo compresso. Anche in questo caso l'allungamento indotto dalle dilatazioni termiche altera in pochi minuti lo schema statico del profilo, che sviluppa la canonica deformata per instabilità flessionale, andando a dislocare gli elementi di rivestimento e portando all'insorgere di stati tensionali e coazioni meccaniche rilevanti, proprio in corrispondenza del taglio kerf che è, per sua natura, il punto più debole di questo tipo di rivestimento. Questa concentrazione di sforzi è rilevante a tal punto da poter indurre la rottura del rivestimento in corrispondenza dei punti di vincolo, sviluppando fessure con andamento diagonale, con conseguente possibile caduta al suolo del rivestimento.

Valutando la stessa configurazione di facciata, ma con profili in acciaio al carbonio ed inossidabile, le conclusioni sono pressoché le medesime, ma esse sono differite dal punto di vista temporale, essendo il coefficiente di dilatazione termica dell'acciaio circa la metà di quello dell'alluminio. Di conseguenza, il profilo inizia a lavorare a compressione solo dopo quindici minuti di esposizione all'incendio, andando anche in questo caso a dislocare gli elementi di rivestimento inducendone la rottura e la conseguente caduta.

La ricerca condotta ha evidenziato delle potenziali criticità, dal momento che le soluzioni più comunemente impiegate garantiscono la stabilità della facciata per un periodo di tempo inferiore ai 30 minuti, mettendo potenzialmente a rischio l'incolumità degli utenti che stanno evacuando l'edificio e delle squadre di soccorso deputate ad intervenire. Le sottostrutture in alluminio possono essere particolarmente vulnerabili alle alte temperature, sia per il rapido decremento delle loro proprietà meccaniche, sia per i rilevanti fenomeni di dilatazione termica. Per le sottostrutture realizzate in ac-

ciaio al carbonio ed in acciaio inossidabile, il cui comportamento è sovrapponibile, le principali criticità risiedono negli effetti delle azioni indirette, dal momento che le temperature raggiunte non sono tali da alterare significativamente la risposta meccanica del materiale. In tutti i casi, l'instabilizzazione dei profili è tale da poter dislocare gli elementi di rivestimento, provocandone la rottura ed il possibile distacco dalla facciata.

Un ulteriore sviluppo della ricerca riguarderà lo studio del comportamento di sottostrutture a montanti e traversi, che offrono un numero maggiore di punti di fissaggio per il rivestimento, oltre a disaccoppiare maggiormente il rivestimento dal comportamento dei montanti. Inoltre, il contributo di reti in fibra di vetro integrati sul retro delle lastre e l'adozione di ulteriori meccanismi di ritegno sono meritevoli di approfondimento quali strategie per scongiurare il rischio di caduta degli elementi di rivestimento.

Sicuramente la direzione intrapresa con la nuova RTV 13 apre a scenari incoraggianti, limitando l'impiego di materiali combustibili in facciata e puntando a strategie di protezione passiva, quali la compartimentazione della facciata, così da limitare l'incendio a porzioni limitate, impedendone la propagazione. Tuttavia, la reazione al fuoco dei materiali rappresenta un parametro fondamentale ma non è l'unico che deve essere considerato. Infine, si evidenzia come alcune proposte preliminari allo sviluppo di una normativa europea pongano esplicitamente l'attenzione sul tema dei detriti che possono staccarsi da una facciata in caso di incendio, definendo limiti in termini di peso e di superficie compromessa, con l'intento primario della salvaguardia della vita umana di utenti e soccorritori.

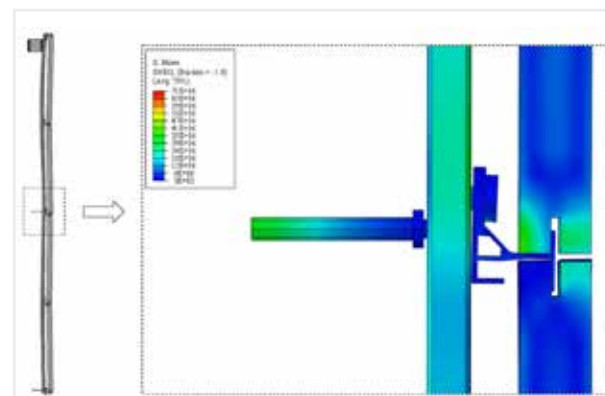


Figura 7 - Concentrazione di sforzi sul rivestimento indotta dall'instabilizzazione del profilo per la configurazione n.3

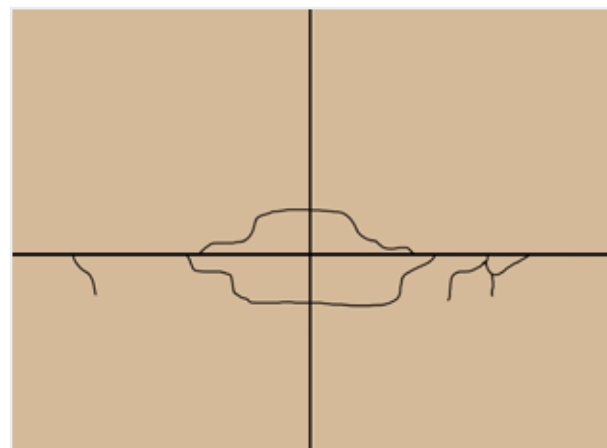


Figura 8 - Rottura del rivestimento indotta dalle deformazioni per la configurazione n. 3

LA PREFABBRICAZIONE MODERNA NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI

a cura di **Sofia Pastori – Giacomo Scrinzi – Enrico S. Mazzucchelli**

Dip. ABC - Politecnico di Milano

Il mercato delle costruzioni caratterizzate dall'utilizzo di soluzioni prefabbricate ed altamente ingegnerizzate, spinto dal continuo sviluppo del settore delle costruzioni in legno, rimane in costante crescita e rappresenta ormai più di una valida alternativa alle soluzioni edilizie tradizionali. Ciò è dovuto, in parte, alla maggiore consapevolezza rispetto alle tematiche ecosostenibili, che giocano un forte ruolo in questo cambiamento del settore edilizio, ma anche agli elevati standard qualitativi che le soluzioni oggi disponibili sul mercato possono garantire.

Nell'area della produzione edilizia, si definisce prefabbricazione il procedimento consistente nella preparazione fuori opera (cioè in luogo diverso dalla sede definitiva) degli elementi costitutivi di un edificio, nel loro trasporto a piè d'opera e nel loro successivo montaggio in cantiere. Si tratta di un processo che opera una scomposizione di un edificio nelle sue parti componenti, realizza queste separatamente nelle sedi più idonee e trasforma il cantiere in una vera e propria officina di montaggio. L'obiettivo della prefabbricazione è lo stesso di quello dell'industria-

lizzazione edilizia, e cioè l'aumento della produttività del settore edile. I vantaggi conseguibili possono sintetizzarsi in maggiore rapidità di esecuzione della costruzione, minore spreco di materiali, riduzione nell'impiego di mano d'opera, miglioramento delle qualità dell'edificio.

Ad oggi, la prefabbricazione in edilizia coinvolge elementi anche di grande complessità funzionale. Per tale motivo, la sua applicazione trova spazio sin dal progetto preliminare della costruzione, creando una forte interconnessione tra fase progettuale, produttiva e di messa in opera di una serie sempre più ampia di elementi strutturali, funzionali ed estetici, con significative conseguenze sull'aspetto tipologico, formale e morfologico degli edifici. Se l'utilizzo di sistemi a celle prefabbricate per facciate continue è già da anni ampiamente diffuso, l'integrazione di serramenti in facciate prefabbricate miste opache-trasparenti è di più recente introduzione e segue il rapido sviluppo di queste soluzioni integrate. Le tendenze che attualmente si stanno delineando prevedono l'integrazione di soluzioni prefabbricate e multifunzionali, ad esempio soluzioni monoblocco che prevedono una posa in opera più semplice e minori rischi di errore durante l'installazione, anche in caso di integrazione in sistemi costruttivi di facciata prefabbricati.

Questo implica la necessità di una definizione di dettaglio dell'interfaccia chiusura-serramento molto accurata, garantendo ottime prestazioni dal punto di vista termico ed elevata qualità nell'installazione.

L'utilizzo di sistemi prefabbricati ha tra gli obiettivi primari la riduzione del rapporto tempi di costruzione/costi, a cui seguono anche l'efficacia e l'affidabilità delle soluzioni, sia in caso di nuove costruzioni, sia in caso di interventi di ristrutturazione. Gli elementi prefabbricati sono studiati per essere realizzati in modo preciso e puntuale e per influenzare positivamente il risultato architettonico finale, così come la gamma sempre più diversificata di soluzioni consente di sfruttare il carattere di modularità e serialità



Figura 01 - Esempio di installazione di scala in legno prefabbricata (fonte: <https://www.mass-timber-solutions.com>).