

COSTRUZIONI A SECCO CON STRUTTURA IN ACCIAIO

Il futuro dell'edilizia



ISSN n° 0010-9673 Poste Italiane SpA - Speciazione in Abbonamento Postale - D.L. 553/2003 (con. in L. 12/02/04 n. 46) Art. 1, comma 1, L. 0/01 Prezzo a copert. € 15,00 - in caso di mancato recapito inviate al C.M.P. di Milano-Rosario per la restituzione al mittente previo pagamento reso

MAG/GIU 2023

CTA
COLLEGIO
DEI TECNICI
DELL'ACCIAIO

UNICMI

RIVISTA BIMESTRALE
PER LA DIFFUSIONE
DELLA CULTURA DELL'ACCIAIO



COSTRUZIONI METALLICHE



effevi

COSTRUZIONI IN ACCIAIO



Architettura. Tecnica. Passione.

CERTIFICAZIONE **UNI EN 1090** IN CLASSE DI ESECUZIONE **EXC4**

Nuovo Ospedale Montecchio Maggiore (VI)
Progetto a cura dell' Arch. Luisa Fontana (Studio LuisaFontanAtelier)



EFFEVI s.r.l.

Via Tezze di Cereda, 26 - 36073 Cornedo Vicentino (VICENZA) ITALIA

www.effevi.net





Tekla® Structures

Il software BIM per la **PROGETTAZIONE COSTRUTTIVA**

I nuovi piani subscription



Tekla Structures Carbon

Per la visualizzazione e la collaborazione.

Consigliato a chi ha necessità di consultare i modelli e gestire le informazioni.



Include Trimble
Connect Business



Tekla Structures Graphite

Per la modellazione e la documentazione progettuale.

Consigliato a chi gestisce progetti fino al dettaglio esecutivo.

Include tutti i benefici della configurazione **Carbon**



Include Trimble
Connect Business



Tekla Structures Diamond

Per la modellazione e la documentazione costruttiva.

Consigliato a chi gestisce progetti fino al costruttivo.

Include tutti i benefici della configurazione **Graphite**.



Include Trimble
Connect Business



Rivenditore unico per l'Italia

since 1990

HARPACEAS
Your digital partner

Viale Richard 3A - 20143 MILANO
Tel. 02 891741 - harpaceas.it

H2 IIS SIDER



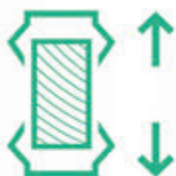
H2 nasce per effettuare prove in ambiente idrogeno gassoso fino a 1500 bar su provini con geometrie differenti: provini lisci, intagliati, provini di meccanica della frattura, provini cavi o tubulari.



Atmosfera di prova variabile, grazie ad un set-up equipaggiato di autoclavi per prove statiche, cicliche e a lungo termine.



IIS e SIDER TEST hanno unito il loro know how fatto di competenza, tecnologia ed esperienza a livello internazionale per dare vita a un nuovo laboratorio specializzato: H2



L'esecuzione dei test è accompagnata dal supporto ingegneristico nelle fasi di revisione delle specifiche tecniche, pianificazione delle prove ed interpretazione dei risultati.

PROVE FINO A 1500 bar in H₂ - Ar - N₂ - CH₄

- ✓ PROVE STATICHE
- ✓ PROVE A LUNGO TERMINE
- ✓ PROVE DI MECCANICA DELLA FRATTURA
- ✓ PROVE CICLICHE, A FATICA
- ✓ PROVE SU RICHIESTE SPECIALI DEL CLIENTE

✉ info@h2iis-sider.it





unimetal-block

BOX PREFABBRICATI

vendita e noleggio

Allestimenti
personalizzati



Box cantiere classico



Uffici multi-livelli



Locali open-space



Strutture sanitarie provvisorie



Dormitori da cantiere



Laboratorio analisi



Locali scolastici prefabbricati



Cabina elettrica



Ufficio mobile



Ambienti climatizzati



Servizi igienici singoli



Vetrina espositiva

Torre San Giorgio (CN) - Numero Verde 800 577 385
Tel. +39 345 1177837 - info: kadeli@unimetal.net - e-mail: unimetal@unimetal.net

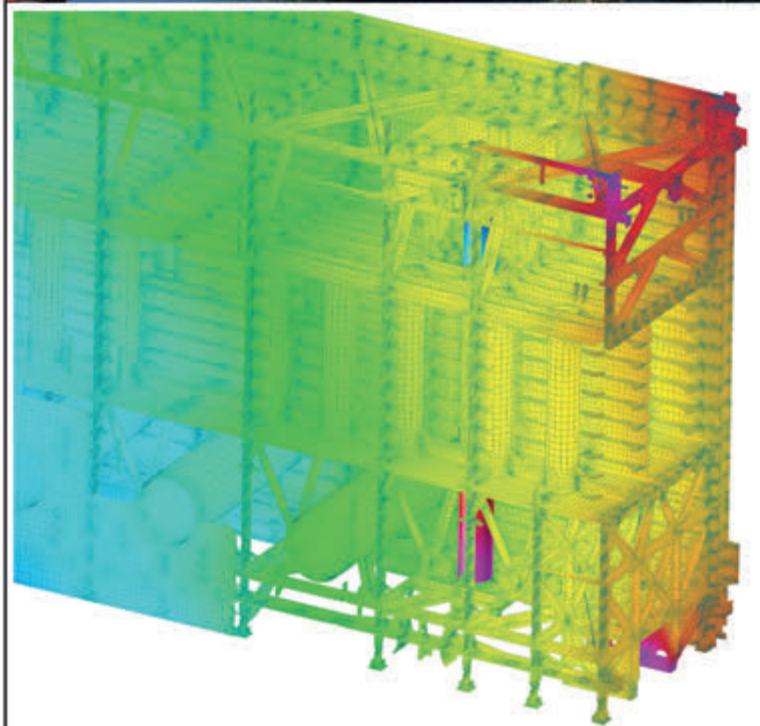
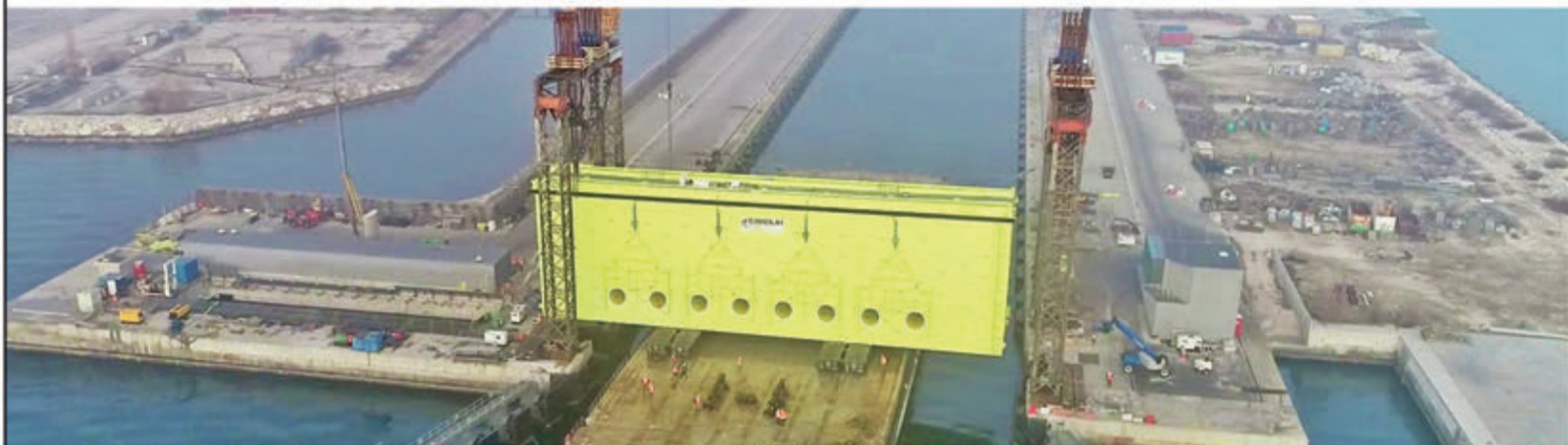
www.unimetal.net

Straus7[®] L'eccellenza FEM accessibile.

Nativo Non-Lineare

www.hsh.info

Nessun limite pratico nel calcolo strutturale agli elementi finiti
PER L'INGEGNERIA E PER L'INDUSTRIA



La Porta lato Mare della conca di navigazione della Bocca di Malamocco a Venezia è l'accesso alla Laguna per il traffico marittimo quando le paratoie del M.O.S.E. sono alzate per la salvaguardia della città dall'acqua alta. La Cimolai S.p.A., specializzata in costruzioni speciali di acciaio, ha realizzato nello stabilimento di Monfalcone (GO) la nuova Porta lato Mare del peso di 1860t e dimensioni 54x16x7m, un manufatto elettro-meccanico dotato di camere di ballastaggio regolate da un sistema idraulico e mosso da argani su rotaie inghisate sul fondo a -14m di profondità. Cimolai ha inoltre progettato la movimentazione terrestre e l'imbarco, tramite SPMT, della Porta sulla barge semi-som Arcalupa, di proprietà della stessa Cimolai, e il trasporto navale da Monfalcone a Malamocco, con relativi interfacce di grillage e seafastening. L'operazione più spettacolare realizzata da Cimolai è stata, però, l'immersione di precisione della Porta nella conca fino all'appoggio sulle rotaie, per mezzo di 8+8 martinetti cavi collocati su due portali tralicciati alti 32m, posti sui due lati della conca di navigazione. Cimolai ha utilizzato il codice di calcolo Straus7 per realizzare il modello FEM completo della Porta per le numerose, in quantità e tipologia, verifiche di resistenza, deformabilità, buckling e fatica, rispetto alle diverse configurazioni e condizioni di carico, in particolare relative allo spettro di moto ondoso del paraggio marino antistante. Inoltre per le operazioni di installazione, sono stati eseguiti i modelli FEM del grillage, accoppiato a modelli parziali della barge accelerati dai moti del natante, e il modello dei portali di sollevamento, che hanno permesso di verificare lo stato tensionale e deformativo con differenti combinazioni di carico, nelle fasi di load-out, navigazione e installazione della Porta. Modelli locali sono stati utilizzati per il progetto dello speciale rigging costituito da ancore di sollevamento e golfari integrati in punti di forza alla sommità della Porta.

COMMITTENTE: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Provveditorato Interregionale per le Opere pubbliche per il Veneto, il Trentino Alto Adige, il Friuli Venezia Giulia
Concessionario Consorzio Venezia Nuova

GENERAL CONTRACTOR: Comar Scarl

PROGETTO ESECUTIVO: SBE

PROGETTO ESECUTIVO DI DETTAGLIO (PED): Cimolai S.p.A.

CARPENTERIA METALLICA: Cimolai S.p.A.

PROGETTO DI LOAD OUT, TRASPORTO VIA MARE, GRILLAGE E INSTALLAZIONE: Cimolai S.p.A.

MARINE WARRANTY SURVEYOR: Det Norske Veritas



Testo, foto e immagini del modello di calcolo per gentile concessione di Cimolai S.p.A.

Distributore esclusivo
per l'Italia del codice
di calcolo **Straus7**



HSH srl - Tel. 049 663888
Fax 049 8758747
www.hsh.info - straus7@hsh.info

COSTRUZIONI METALLICHE - FONDATA NEL 1949

REDAZIONE

DIRETTORE RESPONSABILE: BRUNO FINZI

EDITOR IN CAPO: ELIDE NASTRI Università di Salerno, Italia

COMITATO DI REDAZIONE:

NADIA BALDASSINO Università di Trento, Italia
 ANDREA CAMPIONI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 PAOLO CASTALDO "Politecnico" di Torino, Torino, Italia
 MARIO DE MIRANDA IUAV Università di Venezia
 MAURO EUGENIO GIULIANI Redesco Progetti srl, Milano, Italia
 RAFFAELE LANDOLFO Università di Napoli "Federico II", Italia
 EMANUELE MAIORANA, Università di Bologna, Italia
 ELENA MELE Università di Napoli "Federico II", Italia
 GIOVANNI METELLI University of Brescia, Italia
 PAOLO NAPOLI "Politecnico" di Torino, Torino, Italia
 EMIDIO NIGRO Università di Napoli "Federico II", Italia
 VINCENZO PILUSO Università di Salerno, Italia
 SHAHAB RAMHORMOZIAN University of Auckland, New Zealand
 ATSUSHI SATO Nagoya Institute of Technology, Japan
 SERGIO SCANAVINO Istituto Italiano di Saldatura, Italia
 MARCO SIMONCELLI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 LUCIA TIRCA Concordia University of Montreal, Canada

COMITATO EDITORIALE ESECUTIVO: GIANCARLO CORACINA,
 BENEDETTO CORDOVA, RICCARDO DE COL, ALBERTO VINTANI

COMITATO SCIENTIFICO:

GIULIO BALLIO "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 CLAUDIO BERNUZZI "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 MARIO D'ANIELLO Università di Napoli "Federico II", Italia
 LUIGINO DEZI Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia
 ERIC DUBOSC Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris, France
 DAN DUBINA Polytechnic University of Timisoara, Timisoara, Romania
 MASSIMO MAJOWIECKI Università di Bologna
 FEDERICO M. MAZZOLANI Università di Napoli "Federico II", Italia
 ROSARIO MONTUORI Università di Salerno, Salerno, Italia
 RENATO MORGANTI Università degli Studi dell'Aquila, Italia
 VITTORIO NASCE "Politecnico" di Torino, Italia
 D.A. NETHERCOT Imperial College London, London, UK
 MAURIZIO PIAZZA Università di Trento, Trento, Italia
 COLIN ROGERS McGill University, Montreal, Canada
 LUIS SIMOES DA SILVA University of Coimbra, Portugal
 ENZO SIVIERO Università Telematica E-campus, Italia
 CARLO URBANO "Politecnico" di Milano, Milano, Italia
 RICCARDO ZANDONINI Università di Trento, Trento, Italia

SEGRETERIA: VALERIA PASINA

EDITORE: GIANGIACOMO FRACCHIA EDITORE Srl
 Via C. Goldoni 1, 20129 Milano, tel. 02 49524930
 C.F./P.Iva: 07153040964 - CCIAA Milano REA n° 1939256

UFFICIO ABBONAMENTI: CTA Collegio Tecnico dell'Acciaio,
 20129 Milano, Viale dei Mille, 19
 tel. 02 784711; costruzionimetalliche@ctanet.it
 http://www.collegiotecnicaacciaio.it/costruzionimetalliche/

CONCESSIONARIA PUBBLICITÀ:

Agicom srl, Viale Caduti in Guerra, 28,
 00060 Castelnuovo di Porto (RM)
 Tel. +39 069078285
 www.agicom.it
 Dott.ssa Manuela Zuliani, Cell: +39 3467588821
 manuelazuliani@agicom.it

IMPAGINAZIONE E GRAFICA:

Hutter Edgardo | SINAPSI |
 www.sinapsiweb.info

STAMPA:

GIERRE PRINT SERVICE Srl, Via Carlo Goldoni, 1
 20129 MILANO Tel. 02 49524930
 e-mail: commerciale@gierreprint.com

ABBONAMENTI PER L'ANNO 2021 (6 NUMERI):

Italia: € 60,00 - Estero: € 150,00 - Studenti: € 20,00
 Prezzo a copia: € 15,00

Garanzia di riservatezza per gli abbonati: l'Editore garantisce la massima riservatezza dei dati forniti dagli abbonati e la possibilità di richiederne gratuitamente la rettifica o la cancellazione. Le informazioni custodite nell'archivio elettronico dell'Editore verranno utilizzate al solo scopo di inviare agli abbonati eventuali proposte commerciali (legge 675/96 tutela dati personali)

La rivista non assume alcuna responsabilità delle tesi sostenute dagli Autori e delle attribuzioni relative alla partecipazione nella progettazione ed esecuzione delle opere segnalate dagli stessi Autori

La rivista è inviata ai soci del Collegio dei Tecnici dell'acciaio (C.T.A.)

Iscrizione al Tribunale di Milano in data 8 febbraio 1949,
 n. 1125 del registro.

Iscrizione ROC n. 020654 (Art.16 Legge 62 - 7/03/2001)

ISSN n. 0010-9673

Spedizione in A.P. - D.L. 353/2003 (conv. in L.27.02.14
 N. 46) - Art. 1 comma 1 CNS PD

Questo numero della rivista è stato chiuso in redazione e stampato nel mese di Giugno 2023
 È vietata e perseguibile per legge la riproduzione totale o parziale di testi, articoli, pubblicità ed immagini pubblicate su questa rivista sia in forma scritta, sia su supporti magnetici, digitali, ecc.

COSTRUZIONI METALLICHE

ANNO LXXV MAG GIU 23



www.facebook.com/CMrivista

costruzionimetalliche@ctanet.it

In copertina:

Il futuro dell'edilizia è nell'innovazione e nella industrializzazione, mediante l'uso di strutture a secco realizzate con profili di acciaio piegati a freddo (Foto Vanoncini)



9	EDITORIALE MARCO IMPERADORI	Progettare e costruire con profili formati a freddo
10	INVOLUCRO EDILIZIO FRANCESCA BONELLI, PAOLO GIUSSANI, PAOLO RIGONE	Serramenti e componenti opache, indicazioni progettuali e accorgimenti volti al raggiungimento delle prestazioni attese
27	ARCHITETTURA TECLA CAROLI	Pergola fotovoltaica: struttura reversibile in acciaio per la produzione di energia da fonte rinnovabile
38	STRUTTURE A SECCO MIRKO BERIZZI	L'involucro stratificato a secco: la pelle delle strutture in acciaio
49	ACCIAIO E FUOCO MARGHERITA AUTIERO, DONATELLA DE SILVA, ANTONIO BILOTTA, EMIDIO NIGRO	ANALISI SPERIMENTALE ALLE ALTE TEMPERATURE DEL COMPORTAMENTO DI ELEMENTI STRUTTURALI IN ACCIAIO ZINCATO
64	INGEGNERIA RAFFAELE LANDOLFO, LUIGI FIORINO	Progettazione sismica di sistemi lightweight steel framing nella seconda generazione dell'Eurocodice 8
77	INGEGNERIA CHRISTIAN DAGO NGODJI, MATHIEU GAUCHEY, GÉRALDINE WAIN, FRANCESCO MORELLI, AGNESE NATALI, FRANCESCO LIPPI	Optimization study of High Bay Warehouses by using high strength steels
85	INVOLUCRO EDILIZIO ANDREA BIASI, FEDERICO IORI, STEFANO COSTANTINI, LORENZO PARONI	Un'architettura innovativa che si integra tra i palazzi storici della città di Udine: Palazzo Eden
95	BEST THESIS AWARDS METODI MARCO CAVALLOTTI	"SCHELETRO MONUMENTALE" del "Palazzo di Cristallo" ex Innocenti Maserati. Un valore storico da conservare. Città dell'Esperienza e della Ricerca
101	LIBRI RICCARDO DE COL	
106	LE AZIENDE INFORMANO GIAMBARINI GROUP	LA ZINCATURA A CALDO: DURABILITA', SICUREZZA, SOSTENIBILITA' AMBIENTALE

SE L'ACCIAIO È ZINCATO, IL FUOCO FA MENO PAURA.



La zincatura a caldo, come confermato da studi internazionali, **è un trattamento in grado di rallentare il surriscaldamento** degli elementi strutturali in acciaio sottoposti all'azione del fuoco.

Questo si traduce in tempo prezioso in caso di evacuazione da un edificio in fiamme. Il trattamento di zincatura a caldo si rivela **una difesa importante per contrastare l'avanzata di un incendio.**

OLFEZ | ZITAC SRL | GALVAN | ZINCATURADICAMBIANO

ZINCHE E CERTIFICATE  HIQUALIZINC®



GIAMBARINI GROUP
IL FUTURO PER TRADIZIONE

WWW.GIAMBARINIGROUP.IT



Marco Imperadori | Professore Ordinario di Produzione Edilizia Politecnico di Milano

Progettare e costruire con profili formati a freddo

Le trasformazioni metodologiche nel mondo delle costruzioni, soprattutto in Italia, si sono sempre scontrate con una realtà poco dinamica e spesso resistente all'innovazione tecnologica, soprattutto nel comparto residenziale. Questa resistenza va equamente ripartita tra progettisti, imprese e anche clienti che restano spesso ancorati a uno status quo costruttivo ormai desueto e chiaramente non più rispondente alle attuali tematiche di efficienza energetica, comfort e impatto ambientale.

La nascita di nuove filiere costruttive metalliche con stratigrafie a secco, alternative al latero-cemento, introduce un potenziale di differenziazione che si basa su un processo diverso, potremmo dire su un nuovo paradigma. Queste nuove opportunità di mercato e di ampliamento e crescita della cultura tecnica portano oggi il nostro Paese ad allinearsi rispetto alle realtà europee e offrire alle imprese italiane una più ampia proposta tecnologica. Se nel passato l'applicazione di sistemi costruttivi stratificati a secco era tipica settori specialistici (retail, ospedali, laboratori) oggi l'estensione alla casa è una realtà con diversi player industriali.

I sistemi che sfruttano i profili in acciaio sagomati a freddo (in inglese light steel frame) interessano campi di applicazione vari, nei quali la tecnica costruttiva e

la varietà tipologica, funzionale ed estetica, ci offrono possibili chiavi d'azione verso un concreto e quantificabile approccio sostenibile. Questo è chiaramente allineato agli SDG (Sustainable Development Goals) dell'ONU e ai piani Europei come New European Bauhaus e Next Generation EU e Green New Deal.

La tecnica costruttiva è industrializzata e offre varianti morfologiche infinite (ben diverse dalla rigidità tipica del "prefabbricato" cementizio), in grado di incontrare ogni desiderio compositivo architettonico, visto che la forma finale non è mai predeterminata dagli elementi costruttivi, ma si adatta alla situazione progettuale sempre diversa. Questi processi di design sono quasi sempre su piattaforme dinamiche BIM, sia nella fase progettuale che in quella realizzativa che poi nel facility management.

In Italia è evidente l'attuale stagione di fioritura di produttori e trasformatori che fanno uso dei profili in acciaio formati a freddo (classificati in classe 4) come ossatura portante primaria (balloon frame o platform frame) o anche secondaria di involucro stratificato a secco (facciate 2D prefabbricate che poi si affidano a montatori specializzati) da applicare su strutture a telaio (in acciaio, legno o anche cemento armato). Il processo costruttivo è meccanico. Gli elementi costruttivi esistono già, sono prodotti industrialmente, certificati e controllati secondo un processo di qualità edilizia e vengono assemblati come un kit a secco.

I profili d'acciaio formati a freddo vengono strutturati secondo graticci sia parietali che d'impalcato mediante fissaggi puntuali diffusi (viti, rivetti o bullonature reversibili). Pannelli, materassini isolanti, membrane tecniche e strati prestazionali completano le frontiere costruite. Dal punto di vista strutturale il comportamento è a gusci nervati, molto più simile a quanto si studia nell'ingegneria aeronautica o navale, con elementi sottili supportati da costolature secondo fissaggi diffusi e ridondanti.

Il paradigma costruttivo è sensibilmente diverso dal tradizionale latero-cemento: i telai portanti leggeri e le pareti portanti vengono posti in opera velocemente e raggiungono subito la copertura, consentendo poi di operare in un cantiere protetto dalle intemperie. Molti pre-assemblaggi sono off-site, per consentire condizioni di lavoro più sicure, qualità e anche dotazioni impiantistiche. Una volta issato lo scheletro portante in CFS (*Cold Formed Steel*) si procede col completamento dei tamponamenti sia esterni che interni. I pannelli sandwich (poliuretanic o con nucleo in lana minerale a seconda delle prestazioni desiderate) sono un ottimo ingrediente di questa filiera costruttiva. L'involucro esterno è fissato all'orditura del graticcio portante, su cui poggiano gli impalcato se si tratta di piccole abitazioni, mentre l'involucro interno in gesso rivestito con barriera al vapore è portato da una struttura de-solidarizzata rispetto a quella primaria, così da evitare coazioni strutturali, ponti termici, ponti acustici.

Solamente attraverso l'innovazione è possibile ottenere oggi un prodotto edilizio con elevate prestazioni anti-sismiche, acustiche, termiche, antincendio, funzionali, ecologiche, energetiche, e via dicendo.

Questo processo di industrializzazione delle costruzioni metalliche, grazie all'uso dell'acciaio formato a freddo, consente la totale libertà di espressione estetica in maniera sostenibile, usando meno acciaio ma usandolo meglio, sagomandolo e allontanandolo dal suo asse di inerzia. L'uso di sistemi con profili di esiguo spessore d'acciaio, ci mostra una filiera viva, già matura e in espansione ed è il chiaro segno di una "evoluzione darwiniana" del modo di costruire edifici in Italia.

"Non è la specie più forte o intelligente a sopravvivere bensì quella più disponibile al cambiamento", Charles Darwin.

Serramenti e componenti opache, indicazioni progettuali e accorgimenti volti al raggiungimento delle prestazioni attese

Window systems and opaque components, design tools and details aim to achieve the expected performance

Ing. Francesca Bonelli, Ing. Paolo Giussani*, Prof. Ing. Paolo Rigone:
Studio di Ingegneria Rigone, Milano

L'individuazione del corretto materiale per serramenti ricopre un aspetto fondamentale per garantire una buona efficienza tecnica e prestazione lungo la vita utile del prodotto. I materiali più comuni utilizzati per i serramenti sono tipicamente il legno, l'alluminio e il PVC. Ogni materiale ha i propri vantaggi e svantaggi in termini di prestazioni, costi e impatto ambientale. Oggigiorno si assiste all'impiego di materiali compositivi, quindi a soluzioni tecniche che prevedono, a titolo di esempio, l'accoppiamento di alluminio-legno, oppure legno-alluminio, oppure l'accoppiamento di alluminio con porzioni plastiche in PVC di completamento. Per quanto riguarda le tipologie di serramenti in relazione al tipo di apertura e al numero di ante, esistono molteplici soluzioni disponibili, in funzione delle esigenze specifiche di spazio, interferenza con possibili schermi, visibilità, sicurezza, ventilazione, manutenzione, etc.

Nel corso dell'articolo verranno approfonditi gli aspetti legati all'inserimento dei sistemi di serramento all'interno delle pareti esterne, in particolare di una stratigrafia opaca di tipo a secco, dove vedremo l'importanza di garantire l'efficienza energetica dell'edificio: una buona integrazione può aiutare a ridurre i ponti termici e le dispersioni di calore, migliorando l'efficienza termica dell'edificio. È importante quindi considerare non solo i materiali e le tipologie di serramento, ma anche la loro posizione all'interno della stratigrafia, la risoluzione del raccordo tra elementi, materiali e componenti con caratteristiche differenti. Tutti questi sono aspetti fondamentali nella progettazione di edifici efficienti dal punto di vista energetico. Una scelta accurata può contribuire a ridurre i costi energetici e migliorare il comfort abitativo, considerando questa un'esigenza sempre più urgente.

The selection of materials for windows and doors constitutes an important and critical issue in ensuring performances and durability of the product during its service life. The most commonly used materials for window and door frames are wood, aluminium, and PVC. Each material has its own advantages and disadvantages in terms of performance, cost, and environmental impact. Nowadays windows are designed also using composite materials, such as coupling aluminum and wood framing, or coupling aluminium with cladding PVC profile under specific technical solutions and connections. Regarding the types of windows and doors, in relation to the different kinds of window openings (inward, outward tilt and turning), there are many solutions available, depending on the specific requirements of dimensions, interferences with possible shading systems, visibility, safety in use, ventilation, maintenance, etc.

The integration between window systems and walls, must be designed following specific rules. Particular matters regard the use of dry walls solution where the joints with the openings parts has to be well assessed in terms of thermal and acoustic performance, boundary conditions and durability approach. These are essential requirements to be considered during the design and installation phases that aim to perform energy-efficient buildings.

*Corresponding author. Email: p.giussani@studiorigone.it

1. Introduzione

Il tema dell'efficienza energetica è sempre più sentito a livello europeo. Se si considera che gli edifici sono responsabili di circa il 40% del consumo energetico dell'intera UE e del 36% delle emissioni di gas serra derivanti dall'energia, diventa evidente l'urgenza di costruire edifici ad alte prestazioni e riqualificare energeticamente quelli esistenti. In tal senso, un ruolo fondamentale è ricoperto dall'involucro e i suoi componenti: un'accurata progettazione delle sue parti rappresenta il primo passo per il raggiungimento di standard sempre più elevati. L'involucro edilizio svolge un ruolo attivo nel bilancio energetico, che permette di determinare il fabbisogno energetico dell'edificio attraverso la valutazione dei carichi e delle perdite termiche: ottimizzando le caratteristiche dell'involucro è possibile ridurre la quantità di consumo energetico. In particolare, l'avanzamento tecnologico e l'introduzione di materiali performanti hanno permesso di considerare l'involucro e le sue componenti non solo come elementi disperdenti ma anche come frontiere attive rispetto agli scambi tra l'ambiente interno ed esterno. In tal senso, i serramenti risultano parte integrante del sistema involucro, e come tali è necessario che la loro progettazione segua gli stessi obiettivi. La progettazione integrata deve coinvolgere tutte le componenti del sistema serramento, in quanto il raggiungimento delle prestazioni è direttamente dipendente dalla corretta integrazione delle singole componenti: è fondamentale una conoscenza approfondita delle proprietà dei materiali, delle tecniche di costruzione e delle principali normative in materia di sicurezza in uso e risparmio energetico. A tal proposito, il decreto del 26 giugno 2015 del MISE definisce le modalità di calcolo della prestazione energetica e i nuovi requisiti minimi di efficienza per i nuovi edifici e per quelli sottoposti a ristrutturazione e riqualificazione energetica. Per gli interventi di nuova costruzione e ristrutturazione importante di primo livello il Decreto non prevede valori minimi da rispettare ma valori di riferimento: in questo caso il Committente deve aver deciso, tramite calcoli specifici, quale è la prestazione termica da attribuire ai serramenti; una prestazione dei serramenti piuttosto che un'altra va ad impattare sul consumo di energia dell'edificio nel suo complesso. I calcoli specifici sono contenuti nel documento "relazione tecnica" (ex Legge 10) e i limiti prestazionali così definiti devono essere riportate nel capitolato specialistico. In questo caso la valutazione della prestazione termica, a livello di relazione tecnica, è eseguita puntualmente e non tenendo conto del metodo del serramento campione previsto dalla UNI EN 14351-1. Tale norma stabilisce le caratteristiche prestazionali essenziali delle finestre. Valutando invece gli aspetti legati all'acustica, anche in questo caso la gestione del sistema serramento così come lo studio di dettaglio del nodo di collegamento sul confine dell'imbotte, risulta essere un aspetto fondamentale da relazionare al comportamento globale dell'edificio rispetto alla risposta acustica del sistema involucro.

Considerando che una progettazione accurata e conforme non è sufficiente a garantire il soddisfacimento dei limiti prestazionali di un serramento poiché particolarmente legato alla corretta posa in opera dello stesso, è di fondamentale importanza quanto stabilito dalla norma UNI 11673-1 relativamente alla progettazione del giunto di posa, la scelta di materiali e componenti, coerentemente con le prestazioni da garantire e al fine di risolvere le situazioni di

criticità nel caso di sola sostituzione.

2. I principali materiali impiegati per la realizzazione dei serramenti

La scelta dei materiali utilizzati per la realizzazione del sistema infisso e porta-finestra ha un impatto significativo su diversi aspetti: nella scelta dell'utilizzo di un materiale rispetto agli altri, è necessario considerare fattori quali costo, estetica, durata, efficienza energetica per garantire le prestazioni ottimali e coerenti alle funzioni a cui sono destinati.

Dunque, una prima distinzione va fatta in base ai materiali che compongono il serramento, principalmente legno, plastica pvc, alluminio, acciaio, materiali misti (legno/alluminio, alluminio/pvc, etc.).

2.1 Legno

Il legno è sicuramente il materiale tradizionale per eccellenza, che offre un buon isolamento ma richiede una manutenzione frequente, trovandosi costantemente a contatto con agenti climatici e ambientali: è necessario perciò applicare un trattamento per proteggere il materiale dall'esposizione.

Per la fabbricazione dei serramenti si utilizza legno di elevata qualità, privo di difetti e/o nodosità, oggetto di specifica stagionatura al fine di rendere il prodotto durevole nel tempo e meglio resistente agli agenti atmosferici. La stagionatura permette inoltre di ridurre i fenomeni di ritiro e di fessurazione del legname. Il legno lamellare, realizzabile con qualsiasi essenza, garantisce una qualità maggiore grazie al procedimento utilizzato per la lavorazione dello stesso, risultando privo di difetti estetici e strutturali (figura 1).

Innanzitutto è necessario precisare che solo alcune essenze (tipo di albero da cui viene ricavato un determinato legname) sono indicate per l'utilizzo in esterno. Solitamente per gli infissi esterni il miglior legno si ritrova nel pino svedese trattato con impregnanti, nel rovere, nel niangon, nel castagno, nel douglas e nel meranti. Il rovere è un legno molto duro e resistente; il niangon, appartenente alla famiglia del mogano, presenta una fibra molto compatta; il castagno è molto resistente e durevole ma a causa dell'elevata concentrazione di tannino può presentare macchie conseguenti a bagnature; il douglas di origine americana, molto pregiato perché privo di nodi e dalla fibra molto compatta e molto stabile nel tempo, è caratterizzato dalla particolare colorazione rossastro di tono chiaro; il meranti è un legno durevole agli agenti atmosferici e con una buona resistenza meccanica, ha una tessitura grossolana e irregolare e presenta una superficie a poro aperto.

Il legno si caratterizza per essere un materiale a basso impatto ambientale, infatti oltre ad essere un materiale naturale e riciclabile, il suo ciclo produttivo è a basso consumo e può essere ricavato da foreste gestite mediante la "catena di custodia", documentabile attraverso la certificazione Forest Stewardship Council® (FSC®) o Programme for Endorsement of Forest Certification schemes™ (PEFC™), per citarne alcuni. I protocolli ambientali, vedi LEED, premiano l'impiego di legno certificato FSC nell'ambito di valutazione dei crediti (es. MR Building Product Disclosure and Optimization – Sourcing of Raw Materials).



Fig. 1 | Legni lamellari per serramenti (fonte Gordini)

2.2 PVC

Per quanto riguarda il PVC, sicuramente tra i vantaggi vi è quello di assicurare elevate prestazioni a costi accessibili. Grazie alla loro struttura a camera d'aria (da 5 a 7, etc), i serramenti in PVC garantiscono ottime capacità isolanti (termiche e acustiche) riducendo le dispersioni e limitando la trasmissione di rumore. Il PVC ha scarsa resistenza meccanica e quindi viene spesso rinforzato con l'inserimento di profili metallici, e questo avviene in relazione alla dimensione del serramento e alla tipologia di tamponamento che viene installato (es. triplo vetro, anche nelle forme stratificate, rispetto a soluzioni più semplici in monolstra su vetrocamera tipo doppio vetro). Gli aspetti che coinvolgono questo materiale riguardano inoltre la sua deformabilità sotto l'azione del calore e la stabilità del colore nel tempo, quest'ultima migliorabile attraverso l'applicazione di pellicolati o similari di rivestimento. Nella scelta di un serramento in PVC, si segnala l'attenzione verso la lavorazione di incollaggio dello spigolo, con relativa rifilatura del giunto (tipicamente a 45°) che deve essere priva di irregolarità nell'aspetto. Oltre alle comuni pellicole, il livello qualitativo del profilo in PVC raggiunge oggi finiture di alta gamma, che includono la realizzazione di effetti superficiali 3D che richiamano la venatura del legno su base colorata in pasta.

2.3 Alluminio

I continui miglioramenti tecnologici hanno dato una forte spinta alla produzione di infissi in alluminio. Il suo utilizzo è molto diffuso per i suoi vantaggi: l'alluminio è un metallo duttile, quindi

facilmente lavorabile ed estraribile. I profili per i serramenti sono ottenuti per estrusione con il vantaggio di ottenere sezioni di elevata complessità. Tra i vantaggi dell'alluminio (generalmente in lega primaria di alluminio EN AW-6060) vi sono sicuramente la resistenza e leggerezza, requisiti particolarmente utili soprattutto in caso di vetrate di grandi dimensioni, la possibilità di creare diverse finiture cromatiche, tramite bagno anodico o verniciatura a polvere o elettrocolore, sia in monocolori sia in tinte RAL. A questi processi di finitura si aggiunge un particolare trattamento che viene denominato "sublimazione", che permette di decorare il profilo estruso raggiungendo l'aspetto estetico degli elementi naturali quali legno, metallo, sabbia e marmo, etc. Le quattro fasi principali del procedimento si riassumono con il pretrattamento del profilo, che è volto all'eliminazione delle imperfezioni e delle impurità, la verniciatura (o preverniciatura) a polvere, con funzioni decorative e protettive del fondo, l'applicazione del transfer sublimatico precedentemente stampato con l'effetto desiderato, ed infine la rimozione della pellicola grafica. I profili di alluminio che compongono il reticolo del serramento, sono generalmente composti da una sezione tubolare (parte resistente) e da una o più "alette" di battuta e appoggio del vetro. Nel corso degli anni la geometria del profilo ha subito diverse innovazioni tecnologiche diventando via via oggetto di numerosi studi e approfondimenti volti al miglioramento termico ed acustico del telaio. In primo luogo l'introduzione del giunto aperto che ha stravolto il principio di drenaggio dell'infisso. Questo accorgimento si basa sulla capacità di equalizzare la differenza di pressione tra l'ambiente l'interno e

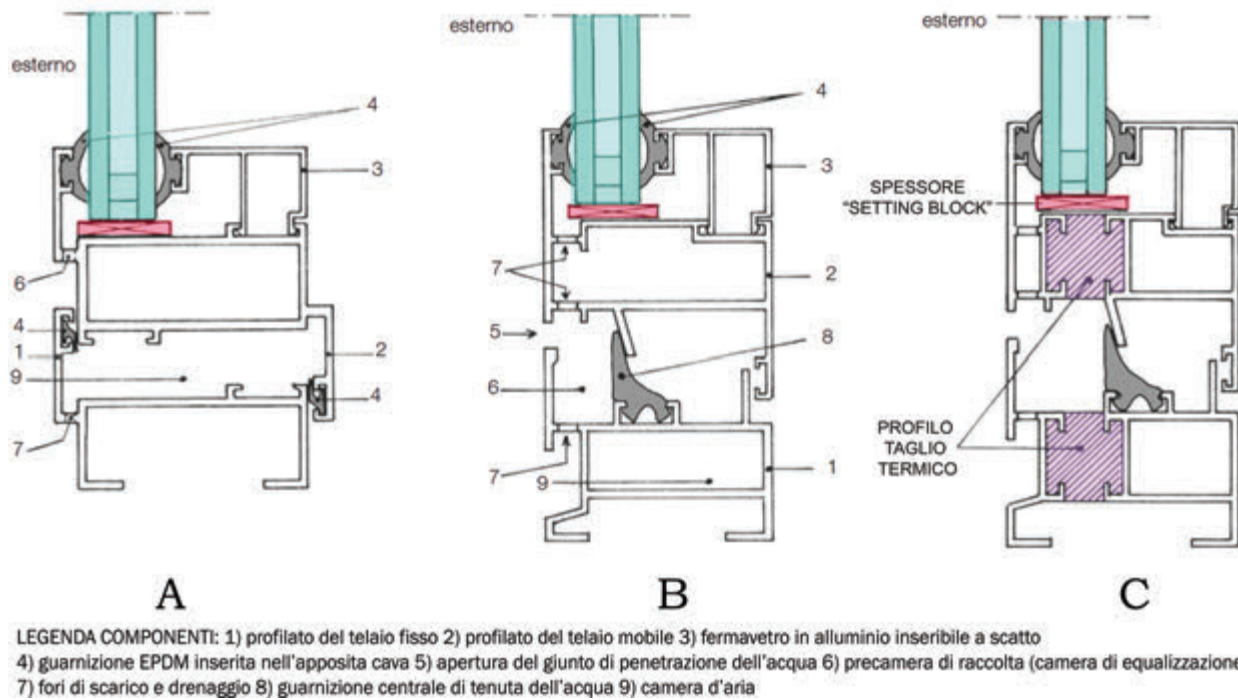


Fig. 2 | Profilo con tenuta in battuta (A) e a giunto aperto con (C) e senza (B) taglio termico

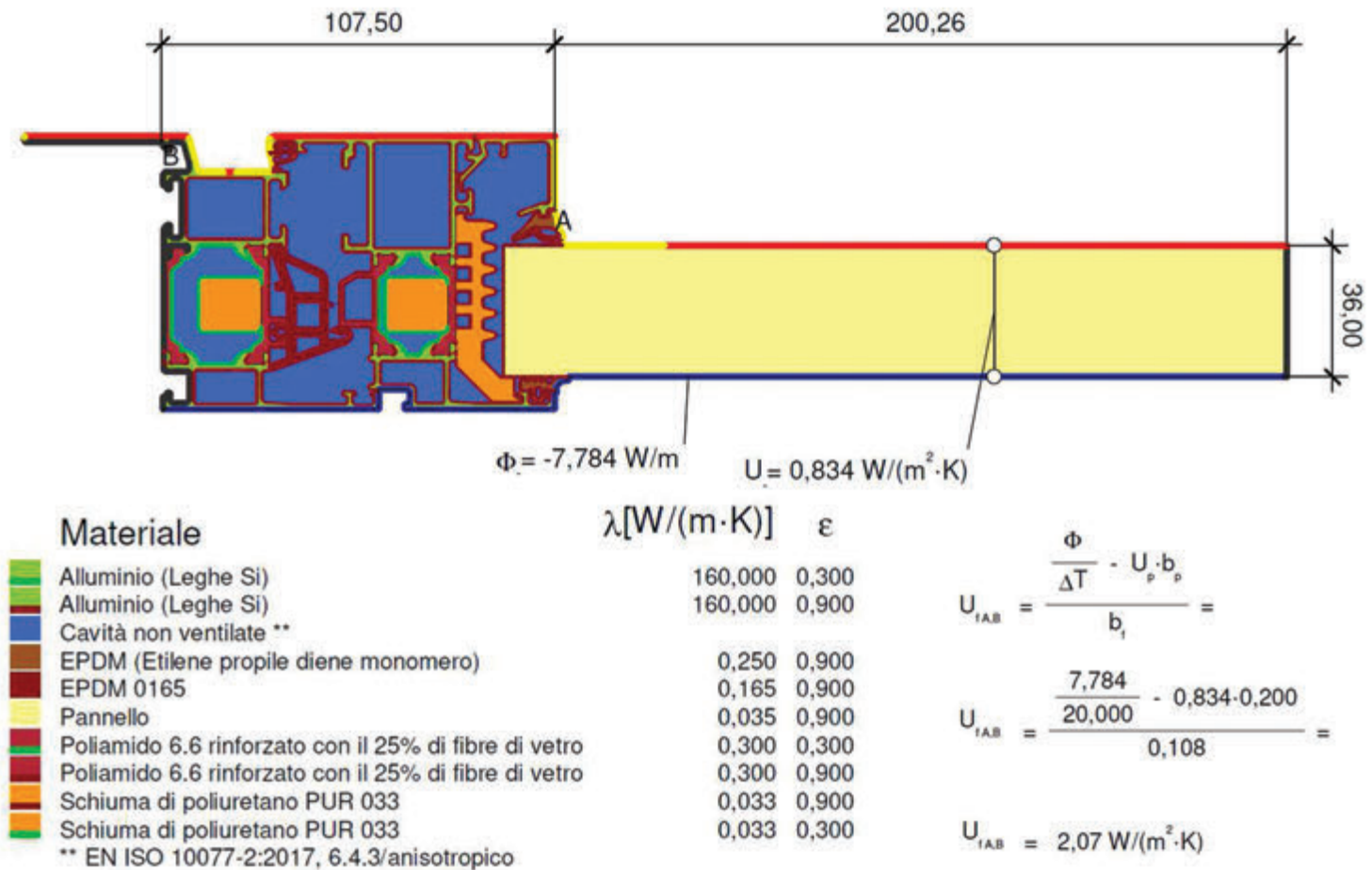


Fig. 3 | Esempio di analisi termica del nodo serramento con software ad elementi finiti

l'esterno del serramento, funziona quindi con il principio di compensazione di pressione (figura 2). Rispetto alla battuta tradizionale, il sistema è studiato per avere una guarnizione centrale (integrata da una seconda per ragioni termiche e acustiche): l'acqua e l'aria eventualmente presenti nella camera esterna perdono la loro pressione - es. dovuta al carico del vento - che da dinamica diventa statica, e in questo modo l'acqua defluisce verso l'esterno per gravità attraverso opportuni fori, o asole, di drenaggio. L'evoluzione dei serramenti in alluminio riguarda, inoltre, l'introduzione del taglio termico (figura 4): al fine di ridurre le dispersioni dovute all'elevata conducibilità (proprietà del materiale) e assicurare elevate prestazioni in termini di isolamento termoacustico, viene interposto del materiale isolante interrompendo la continuità della sezione metallica. L'interruzione della sezione avviene più comunemente tramite l'impiego di elementi plastici rigidi, in poliammide, che collegano due profili indipendenti, inseriti a pressione o bloccati meccanicamente (figura 5).

Il valore di isolamento termico viene influenzato dalla lunghezza e spessore delle barrette, dalla dimensione delle camere che si vengono a creare, dalla forma e dalle dimensioni delle guarnizioni. Volendo valutare il dato legato alla conducibilità termica λ (lambda) dell'alluminio (circa 170 W/mK) rispetto a quella della poliammide 66 GF25 (circa 0,2-0,3 W/mK), è evidente come questo elemento sia cruciale per l'abbattimento delle dispersioni termiche attraverso la telaistica del serramento. Le barrette in poliammide sono le più utilizzate per la realizzazione di tagli termici grazie alle loro caratteristiche, tra cui la resistenza meccanica: esse devono garantire non solo una prestazione ottimale dal punto di vista termico, ma sono anche l'elemento che deve sopportare l'usura dovuta agli agenti atmosferici ed agenti chimici per la pulizia, nonché resistenza meccanica ai carichi statici (peso proprio dei vetri) e dinamici (azione del vento), garantire limitate dilatazioni termiche in assenza di umidità, resistenza alle distorsioni ed ai carichi impattivi. Le proprietà meccaniche della poliammide vengono migliorate incorporando in essa fibre di vetro. La normativa di riferimento per la valutazione del comportamento meccanico dei profili con taglio termico è la EN 14024 "Profili metallici con taglio termico - Prestazioni meccaniche - Requisiti, verifiche e prove per la valutazione", che specifica le prove per determinare i valori caratteristici delle proprietà del profilo al fine di valutare l'idoneità del materiale utilizzato per il taglio termico.

2.4 Acciaio

La tecnologia del taglio termico viene utilizzata anche nei profili in acciaio. L'utilizzo di questo materiale per i serramenti offre la possibilità di realizzare serramenti di grandi dimensioni grazie all'elevata resistenza, garantiscono buone prestazioni termiche e un'elevata durata nel tempo. È importante proteggere i profili

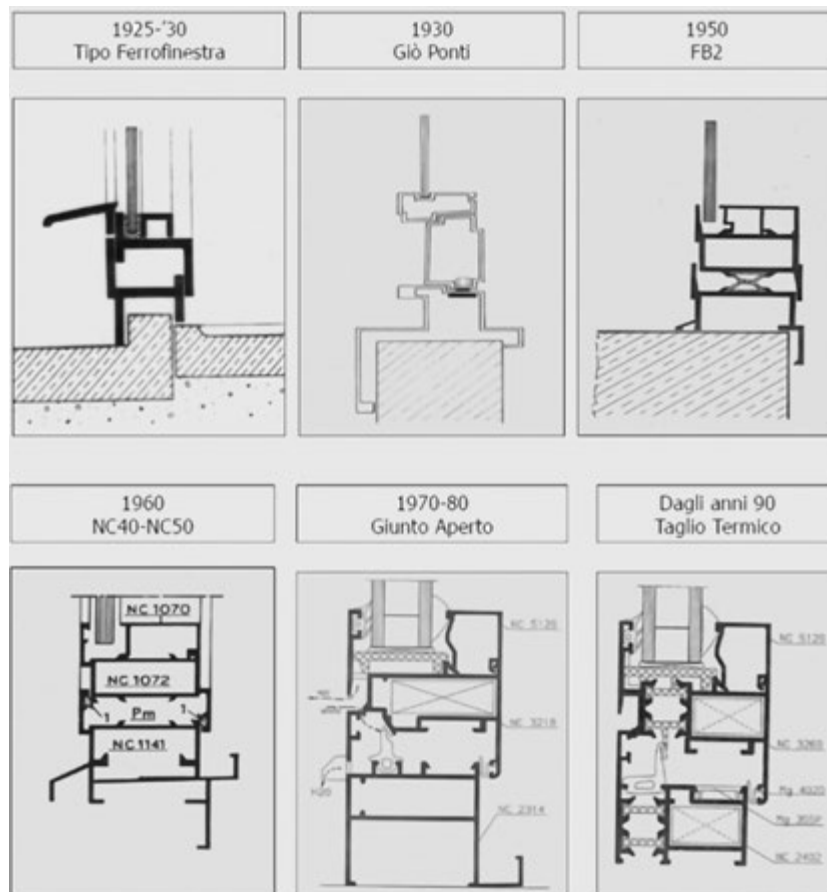


Fig. 4 | Serramenti in alluminio - evoluzione nel tempo (fonte: Metra SpA)

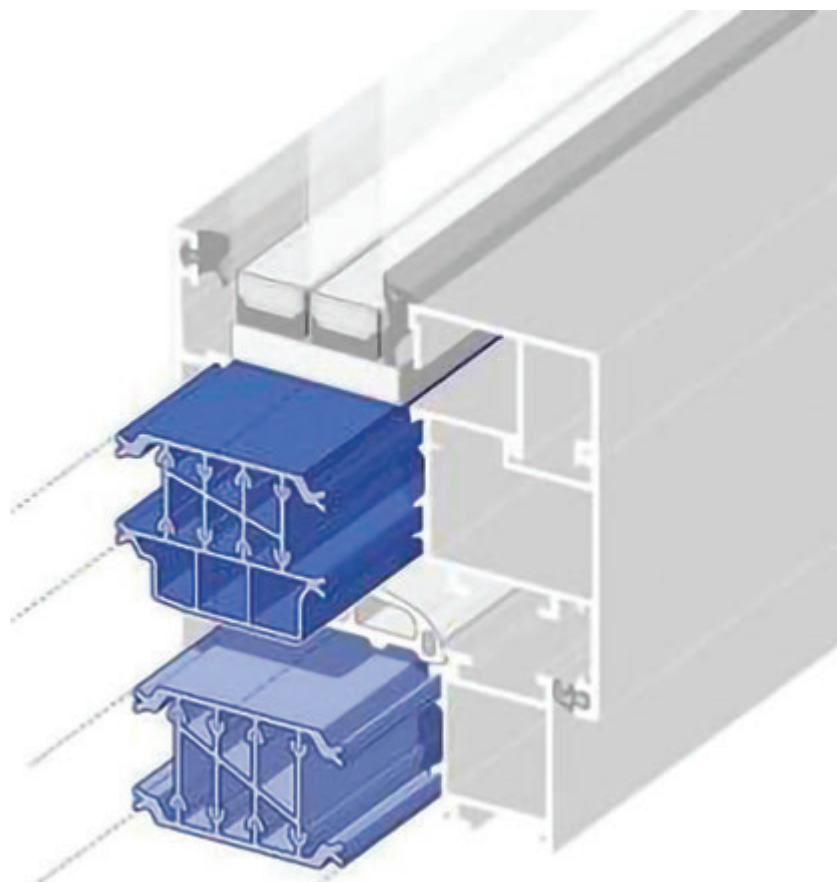


Fig. 5 | Profilo di taglio termico posto all'interno di un serramento per finestra (fonte Technoform)

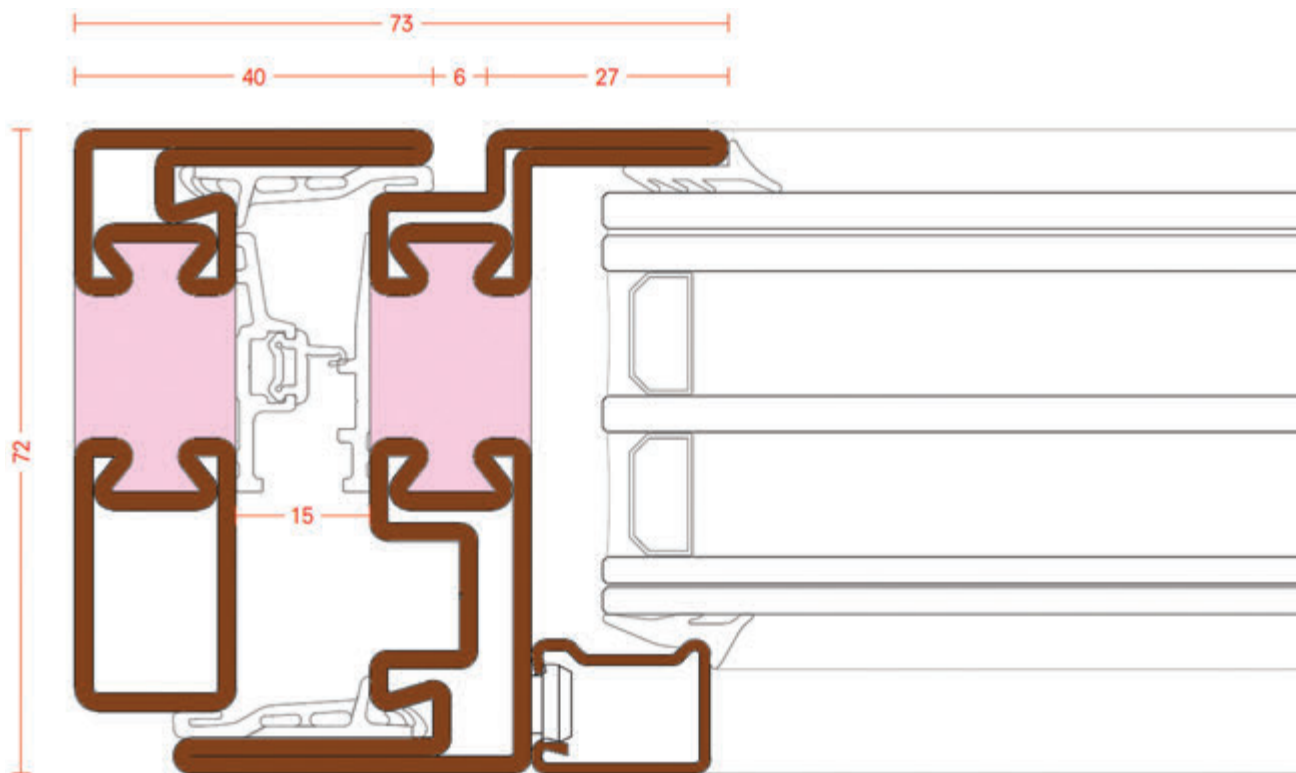


Fig. 6 | Profilo tipo in acciaio (fronte MOGS)

dall'ossidazione, per cui necessitano di opportuni trattamenti di protezione superficiale. Questa tipologia di profili è realizzata con l'accoppiamento di semigusci ricavati tramite profilatura a freddo di nastro d'acciaio solitamente in spessori 1-2 mm assiemati meccanicamente ad un elemento centrale in materiale isolante in poliammide PA66 (figura 6). I profili utilizzati hanno forma ad L, T, Z, C, Zoccolo, per la composizione dei vari nodi fissi ed apribili dell'infisso. Per il raggiungimento delle prestazioni di tenuta all'acqua e permeabilità all'aria, i serramenti in acciaio sono dotati di guarnizioni con piedino poste su alette di battuta a innesto su cava continua per sistema di tenuta interna ed esterna del tipo a "doppia battuta".

2.5 Profili misti

Per quanto riguarda i profili misti, solitamente si parla di impiego di serramenti in legno-alluminio: in questo modo è possibile sfruttare le proprietà di entrambi i materiali, facendo attenzione ai differenti coefficienti di dilatazione termica. Prevedono una parte portante e una parte di protezione e coibentazione. La funzione di elemento portante può essere svolta, a seconda dei casi, dalla parte in legno o da quella in alluminio. Quando si fa riferimento ai profili in legno-alluminio si intende che il profilo di alluminio è utilizzato come rivestimento. Viceversa, i serramenti tipo alluminio-legno vedono il legno come materiale di finitura e rivestimento. Nel caso di profili misti, l'impiego del legno avviene sul lato interno del profilo. I profili misti possono essere anche in alluminio - PVC: sono costituiti da un telaio in PVC sul quale sono fissati profili di alluminio che hanno quindi la funzione estetica di rivestimento e finitura. Il PVC ha il compito strutturale e di isolamento termico, mentre l'alluminio ha inoltre la funzione di protezione dagli agenti esterni.

Nell'elencare i possibili materiali componenti i serramenti, è necessario fare una considerazione: la componente telaio è associata, solitamente, alla parte trasparente. Il confronto tra serramenti costruiti in materiale diverso deve essere fatto sulla base della prestazione complessiva (si parla della trasmittanza del sistema) e non sui valori di trasmittanza dei singoli componenti. Verificato il valore limite necessario per la progettazione del sistema, vengono quindi calibrati i valori di trasmittanza delle singole componenti e questo può essere fatto attraverso lo studio e l'analisi dei flussi termici, delle temperature superficiali, e della trasmittanza dei nodi attraverso simulazioni agli elementi finiti (figura 3) con software di calcolo (secondo le indicazioni della norma UNI EN 10077-1/2).

3. Aspetti funzionali dei serramenti

Un'ulteriore classificazione dei serramenti viene fatta in base alla tipologia di movimentazione: finestra, porta-finestra, luci fisse. I serramenti apribili e porta-finestre vengono classificati in base alle modalità di apertura e al numero di ante: la modalità di apertura determina i differenti modelli funzionali. La normativa UNI EN 12519:2018 definisce tutte le tipologie di serramento più comuni e le loro modalità di azionamento, con un elenco di immagini rappresentative delle diverse configurazioni (figura 7).

I sistemi di apertura vanno definiti tenendo in considerazione le situazioni specifiche nel contesto del costruito e le diverse attività che vengono svolte in relazione alla destinazione d'uso degli spazi. È opportuna un'analisi degli aspetti funzionali dei diversi sistemi di apertura, secondo i criteri di sicurezza, circolazione, ventilazione, fruizione visiva, manutenzione e pulizia, interferenza con i componenti, facilità di manovra, permeabilità all'aria, tenuta all'acqua, acustica e resistenza al carico da vento.

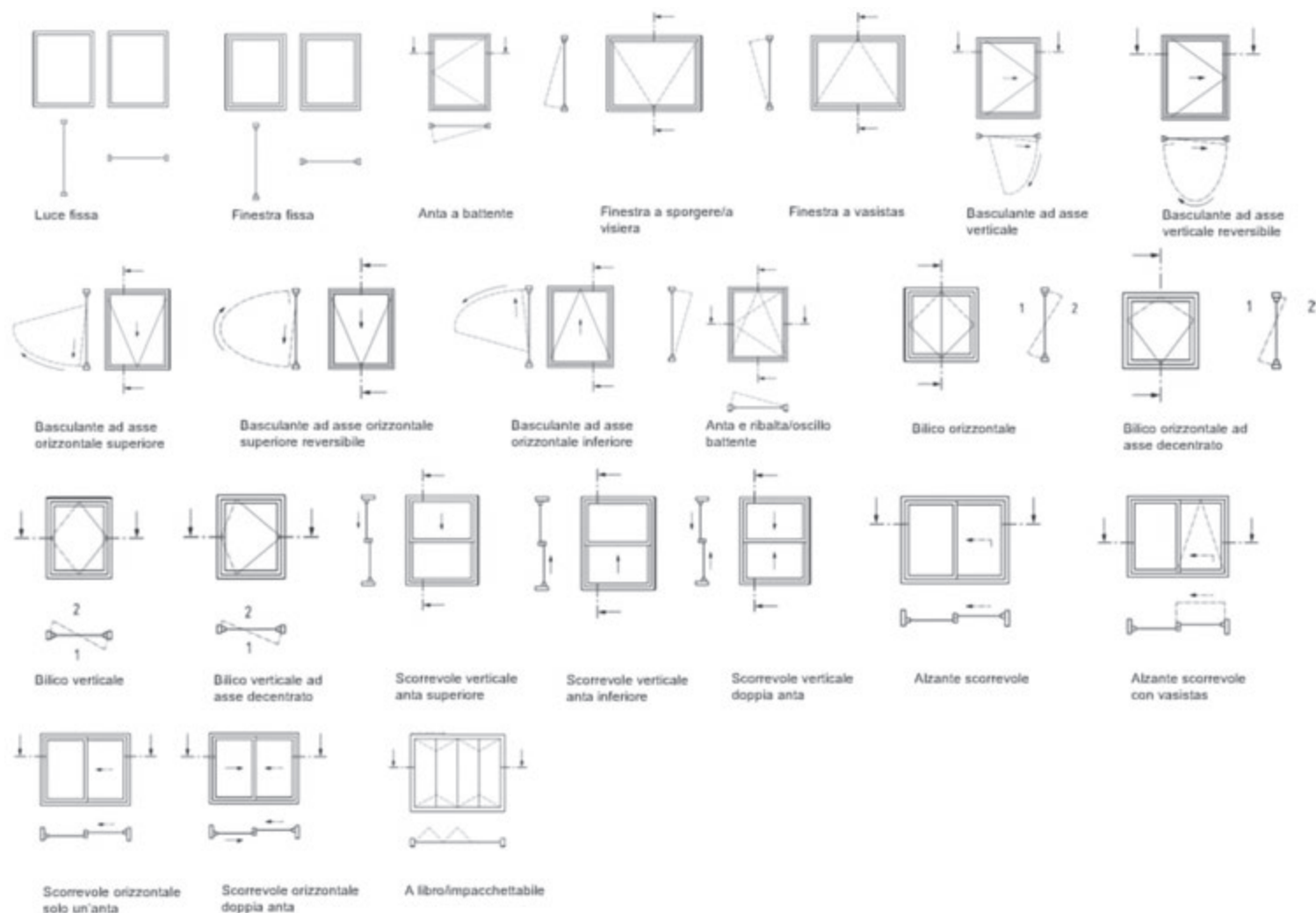


Fig. 7 | Tipologie di apertura di serramenti ad anta singola e multi anta

Il modello più diffuso e “semplice” di apertura è quello dell’anta a battente: rotazione su asse verticale laterale con apertura verso l’interno o l’esterno. Si caratterizza in funzione del senso di apertura, sia in riferimento all’interferenza con i componenti adiacenti sia in relazione alla permeabilità all’aria.

La prestazione di permeabilità all’aria (e di tenuta all’acqua) è direttamente collegata al senso di apertura: con apertura verso l’interno il vento in pressione tende ad allontanare l’anta mobile rispetto alle linee di battuta, riducendo la prestazione. Viceversa, con vento in pressione e apertura verso l’esterno, l’anta viene compressa lungo le linee di battuta andando a migliorare significativamente la capacità del sistema rispetto alla tenuta all’acqua e permeabilità all’aria. Il principio si traspone in modo analogo in condizioni di vento con pressione negativa (depressione). Gli aspetti legati alla resistenza del carico da vento devono essere analizzati anche rispetto alle verifiche locali nei punti di innesto delle cerniere laterali: ciò implica un’eventuale limitazione nelle dimensioni delle ante e un’attenta soluzione della vetrazione (tassellatura corretta), per cui si fa riferimento alla normativa UNI 12488, e del sistema di bloccaggio (figura 8).

L’apertura a vasistas si caratterizza per l’anta incernierata nella parte inferiore del serramento. La sua funzione è prevalentemente finalizzata alla ventilazione, favorendo il tiraggio naturale di aria

dalla zona superiore. È quindi un sistema ottimale per garantire un ricambio continuo d’aria (in estate il raffrescamento può essere limitato a causa della dimensione ridotta dell’apertura). L’ingombro interno è modesto e non ci sono interferenze con schermi ombreggianti esterni (se presenti). L’apertura viene limitata mediante bielle, braccetti di apertura o altri sistemi di arresto che devono essere verificati opportunamente considerando il carico trasmesso dall’anta e l’effetto dei “colpi di vento”.

Nei sistemi a sporgere il carico dell’anta viene scaricato sulle cerniere poste sull’asse di rotazione orizzontale superiore, che per questo motivo devono essere opportunamente dimensionate. Il sistema è dotato di elementi di regolazione di apertura che sono progettati in funzione del carico dell’anta e del carico del vento. In posizione aperta, l’anta mobile garantisce comunque un’adeguata protezione all’acqua per modesti fenomeni temporaleschi. Gli aspetti del carico dell’anta influenzano anche l’estensione dell’apertura che è direttamente collegata all’accessibilità della persona che deve raggiungere la maniglia in condizioni agevoli e di sicurezza. La ventilazione avviene lungo la proiezione inferiore del serramento e in corrispondenza dei triangoli laterali: nel ricambio dell’aria deve essere considerata la superficie utile a disposizione considerando l’impossibilità di completa apertura. Un possibile svantaggio riguarda la difficoltà di pulizia della faccia esterna del vetro (non

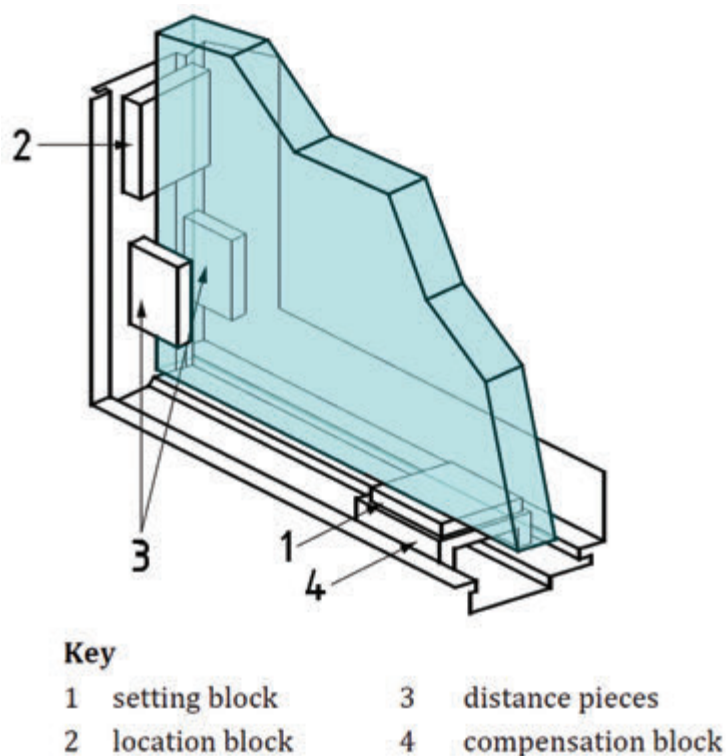


Fig. 8 | Schema tipologie setting block (estratto norma UNI EN 12488)

accessibile dall'interno).

L'apertura a bilico verticale consente una buona movimentazione dell'aria ammettendo una circolazione attorno all'anta semiaperta, una facile manutenzione e pulizia di entrambe le facce del tamponamento vetrato. Tutto il peso dei bilici verticali grava attorno al perno inferiore: la trasmissione dei carichi attraverso i vari elementi di telaio deve essere attentamente progettata per evitare concentrazioni di carico eccessive e deformazioni dei supporti. In questo tipo di sistema la tenuta all'acqua e all'aria può risultare critica a causa dell'inversione della battuta in corrispondenza dei perni di rotazione.

Quando l'asse di rotazione è orizzontale, in corrispondenza della mezzeria della parte mobile, si ha il sistema di apertura a bilico orizzontale: tutto il peso dell'anta mobile grava sui due perni laterali i quali oltre alla funzione statica e di supporto devono garantire la mobilità. L'anta aperta resta appoggiata sui due perni laterali e si flette sull'asse di rotazione. I montanti laterali dell'anta sono sollecitati a flessione: il massimo di tale sollecitazione coincide proprio con il punto indebolito dall'inserimento dei perni. I bilici orizzontali consentono una buona ventilazione, ammettendo la fuoriuscita di aria dalla zona superiore e l'ingresso in corrispondenza della zona inferiore. I problemi di tenuta all'aria sono simili a quelli del bilico verticale, mentre quelli relativi all'acqua sono meno significativi perché la battuta inferiore è protetta. La presenza di tende, anche sul lato interno, è spesso di difficile impiego in quanto potrebbe ostacolare i movimenti del telaio. Questa tipologia di apertura è spesso impiegata anche come lucernario da tetto.

Un altro sistema comunemente utilizzato, nel caso di ampie aperture e accesso a spazi esterni è quello ad apertura scorrevole orizzontale. Consente luci rilevanti con telai di sezione molto

snella e non comporta problemi di manovrabilità o di ingombro interno (grazie all'introduzione di sviluppi tecnologici avvenuti negli ultimi anni come nuovi cuscinetti di scorrimento, eventuali attuatori di movimentazione a supporto della manovrabilità, etc). I giunti verticali (laterali) sono in genere costituiti da guarnizioni a battuta, mentre quelli orizzontali da spazzole che garantiscono lo scorrimento. I sistemi più recenti prevedono l'abbassamento del telaio mobile quando si chiude il serramento: in questo caso si parla di scorrevoli alzanti e traslanti. È importante risolvere le infiltrazioni di aria localizzate in corrispondenza degli estremi del giunto centrale verticale, dove il passaggio tra i due piani di scorrimento implica una discontinuità di battuta. Nelle finestre scorrevoli, l'acqua che riesce ad attraversare le guarnizioni è solitamente raccolta e condotta in una canalina posta in corrispondenza del traverso inferiore del vano, da lì evacuata verso l'esterno attraverso lavorazioni e fresature della sezione tubolare del telaio. La pulizia e la manutenzione di questi sistemi deve interessare non solo la telaistica e il tamponamento vetrato, ma anche le parti scorrevoli e le sedi delle guide di movimentazione del telaio fisso.

4. Le prestazioni dei serramenti

Le caratteristiche prestazionali dei serramenti coprono un ventaglio di aspetti tra cui ricordiamo le proprietà termiche, acustiche, di sicurezza, di tenuta all'aria e all'acqua e di resistenza alle sollecitazioni esterne come il vento e il carico antropico. La normativa europea UNI EN 14351-1 definisce i requisiti minimi di prestazione e le caratteristiche essenziali per i serramenti, che devono essere testati in laboratorio per valutare il loro comportamento in relazione a questi parametri. Per caratteristiche essenziali si intendono quelle relativamente alle quali i Costruttori dovranno obbligatoriamente dichiarare la prestazione offerta di ogni prodotto: in alcuni casi il Costruttore può avvalersi dell'opzione NPD "Prestazione non Determinata", purché venga dichiarata la prestazione di almeno una delle caratteristiche essenziali.

Ad oggi, in Italia, le caratteristiche obbligatorie da dichiarare per i serramenti sono quelle di isolamento termico e permeabilità all'aria, oltre che quelle di trasmissione luminosa e fattore solare che, tuttavia, non rientrano tra le caratteristiche essenziali per i prodotti in questione. È necessario puntualizzare il fatto che tali obblighi provengono da disposizioni in materia di risparmio energetico in edilizia e non riguardano serramenti con trasmittanza termica superiore a 5 W/m²K. Il livello di prestazione termica dei serramenti, espressa in termini di trasmittanza termica, deve essere scelto in conformità alle disposizioni legislative vigenti in materia di risparmio energetico in edilizia, nazionali e regionali, applicabili all'intervento edilizio in cui si configura la fornitura di serramenti. A seconda delle caratteristiche del campione, nell'appendice E della norma sono contenute le regole di estendibilità dei risultati delle prove iniziali, ovvero la valutazione dei prodotti per i quali possono essere considerati validi i risultati ottenuti dalle prove sui campioni. Le regole di estensione dei risultati sono valide nell'ipotesi che il serramento campione e i serramenti di produzione soddisfino il concetto di similar design.

La permeabilità all'aria, la tenuta all'acqua e la resistenza al carico del vento sono caratteristiche prestazionali "ambientali" in quanto

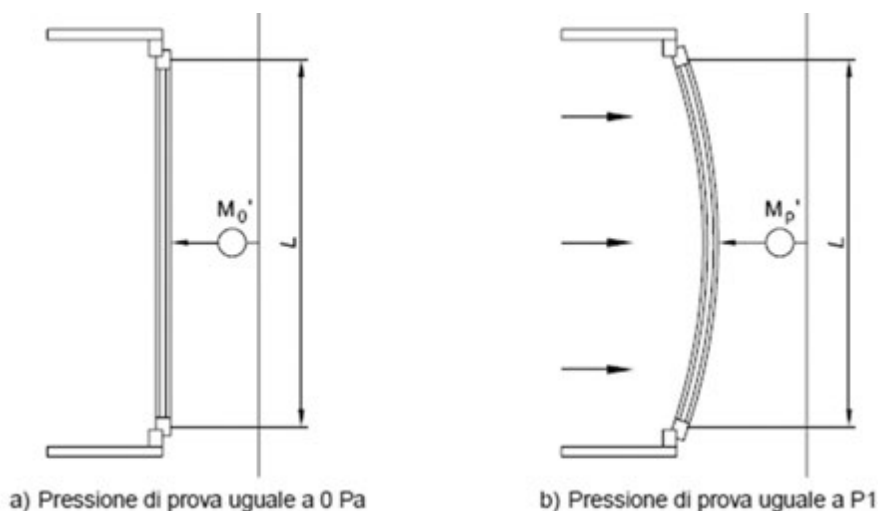


Fig. 9 | Prova di carico su telaio - misuratori di prova (estratto UNI 12211)

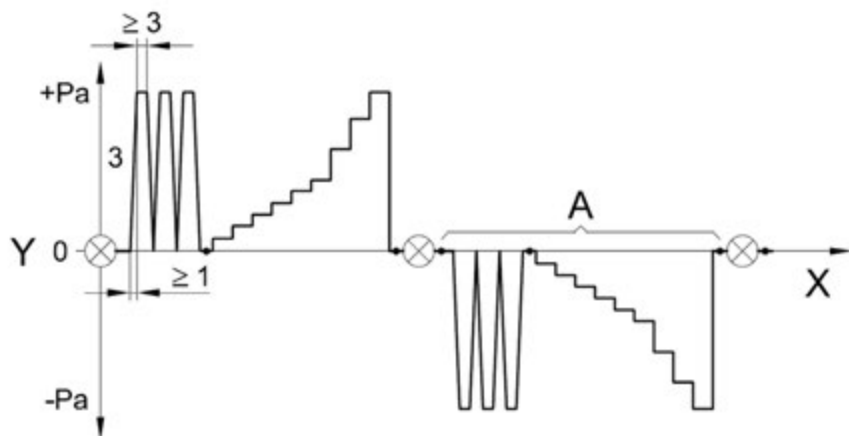


Fig. 10 | Permeabilità all'aria su campione (estratto UNI 1026)

sono legate al contesto geografico e geometrico dell'edificio.

La norma UNI 11173 rappresenta un valido riferimento che il progettista può sfruttare per l'individuazione delle prestazioni minime del manufatto (serramento, facciata, etc) selezionate rispetto al carico di vento di progetto.

Le classi minime per la resistenza al carico di vento sono definite in accordo alla norma UNI EN 12210. Il criterio di scelta della classe di resistenza al carico del vento dei serramenti esterni è integrato con quello di scelta della freccia massima di inflessione correlato alla lunghezza L dell'elemento di telaio più sollecitato dei serramenti, e sono date indicazioni differenti a seconda che nei serramenti siano presenti vetrate isolanti piuttosto che singole. La norma contiene appendici informative relative alla scelta dei serramenti in base ad altre caratteristiche prestazioni qualora necessarie per lo specifico progetto.

4.1 Resistenza al carico da vento

Viene misurata in laboratorio secondo la metodologia di prova indicata dalla norma UNI EN 12211. Questo test consiste nell'inserire il serramento da testare in un cassone e nel creare, mediante apposite macchine di compressione, le condizioni di pressione P_1 , P_2 e P_3 , con P_1 pressione statica (ovvero il carico di

vento di progetto), P_2 pressione pulsante pari a $0,5P_1$ per 50 cicli e P_3 pressione di sicurezza posta pari a $1,5P_1$. Il serramento sottoposto alle pressioni P_1 e P_2 non deve presentare né degradi visibili ad occhio nudo alla distanza di 1 m e con illuminazione naturale, né rotture o deformazioni permanenti che provochino il degrado funzionale del serramento (figura 9). Al termine del test la permeabilità all'aria del serramento non deve aumentare oltre il 20%. Alla pressione P_3 il serramento sottoposto a prova deve rimanere chiuso e non sono ammessi distacchi di parti nonostante siano accettabili eventuali difetti nei singoli componenti (flessioni e svergolamenti negli accessori, fessurazioni nei telai).

La norma UNI EN 12210 "Finestre e porte - Resistenza al carico di vento - Classificazione" definisce poi cinque classi di resistenza al vento. La classe minima (1) corrisponde ad un carico vento di progetto P_1 di 400 Pa, mentre i serramenti di massimo livello prestazionale (classe 5) resistono ad un'azione del vento di 2000 Pa. È prevista inoltre la classe eccezionale (Exxxx) da attribuire a serramenti che devono essere testati a carichi del vento superiori a quelli previsti per la classe 5.

4.2 Permeabilità all'aria

Vengono definite quattro classi di prestazioni nelle quali la classe 4 rappresenta il livello massimo, secondo la norma UNI EN 12207, che riferisce la permeabilità all'aria sia rispetto all'intera area dei serramenti (m^3/hm^2) sia rispetto alla lunghezza dei giunti apribili (m^3/hm). La norma indica che le prove di laboratorio devono essere eseguite secondo la metodologia prevista dalla UNI EN 1026 (figura 10). Il confronto dei risultati ottenuti con i diagrammi proposti dalla norma porta all'attribuzione della classe di prestazione.

4.3 Tenuta all'acqua

La norma UNI EN 12208 riporta due classificazioni a seconda del metodo di prova utilizzato, nel caso di serramenti completamente esposti o per specchiature parzialmente schermate. La classificazione è funzione della pressione massima raggiunta e del periodo di tempo trascorso prima del manifestarsi di infiltrazioni.

4.4 Trasmittanza termica

La trasmittanza termica dei serramenti può essere determinata utilizzando il metodo della camera calda (EN ISO 12567-1, a mezzo di prova di laboratorio) o il metodo tabellare indicato nel prospetto B.3 della norma di prodotto UNI 14351-1 o utilizzando la UNI EN ISO 10077.

In funzione del tipo di intervento (nuova costruzione, ristrutturazione di primo livello o di secondo livello, riqualificazione energetica) vi sono dei limiti di trasmittanza da rispettare. Per interventi di

ristrutturazione di secondo livello e di riqualificazione energetica ci si riferisce al Decreto Requisiti Minimi del 2015 che impone dei valori da rispettare in funzione della zona climatica. In questo caso è possibile calcolare la prestazione secondo quanto previsto dalla UNI EN 14351-1. Per interventi di ristrutturazione importante di primo livello o di nuova costruzione i valori di trasmittanza

facciata esterna dell'edificio (Isolamento acustico standardizzato di facciata $D_{2m,nT,W}$) non fornendo, di fatti, nessun limite sul parametro che quantifica le prestazioni acustiche dei serramenti in laboratorio.

La prestazione acustica dei serramenti è funzione di diversi fattori, alcuni definibili a priori come ad esempio il tipo di vetro, la tipologia di profili dei telai, i giunti tra telaio e vetro, il giunto di interfaccia serramento - muratura e la permeabilità all'aria del serramento (figura 11). Altri fattori sono invece difficilmente definibili in anticipo quali, ad esempio, altezza dal suolo, orientamento rispetto alla sorgente sonora, conformazione dell'ambiente esterno, corretta posa in opera del serramento.

I metodi ai fini della determinazione dell'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w dei serramenti, e validi ai fini della marcatura CE, sono:

- il metodo di prova di laboratorio in accordo alla norma UNI EN ISO 10140-2 "Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Parte 2: Misurazione dell'isolamento acustico per via aerea",

che risulta essere la metodologia più rigorosa. La prova di laboratorio secondo UNI EN ISO 10140-2, eseguita da Ente Notificato, prevede di predisporre un ambiente "sollecitante", in cui è presente la sorgente di rumore, e un ambiente "ricevente", separati dal serramento di dimensioni standard 1,23x1,48 m sottoposto a prova. Nella norma viene indicata la procedura, che prevede che le misurazioni vengano effettuate in funzione della frequenza, almeno in bande di 1/3 di ottava.

- il metodo di calcolo tabellare in accordo alla norma di prodotto UNI EN 14351-1, Appendice B. Il calcolo non è applicabile a finestre doppie o accoppiate e a portefinestre.

I risultati dei due metodi devono essere valutati in conformità alla EN ISO 717-1. Ottenuto il valore di R_w del serramento, e calcolando il potere fonoisolante di tutte le parti che la compongono, è possibile calcolare l'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, il cui valore verrà poi verificato in opera e confrontato con i limiti imposti dal Decreto.

È importante sapere che il comportamento acustico dei componenti edilizi è fortemente influenzato, indipendentemente dalla loro prestazione dichiarata a livello di laboratorio o mediante calcoli previsionali, dalla corretta esecuzione e posa in opera.

5. La posa in opera

Il punto più critico nella realizzazione di un sistema di serramento particolarmente performante è evidentemente la posa in opera. La norma UNI 11673-1 interviene proprio in questo contesto e fornisce indicazioni sulla progettazione dei giunti di posa affinché le prestazioni siano coerenti con quelle dichiarate per il serramento e definisce i requisiti di base dei materiali di sigillatura, riempimento e isolamento.

In particolare, in riferimento al comportamento tecnologico del sistema serramento-vano murario si deve considerare che le

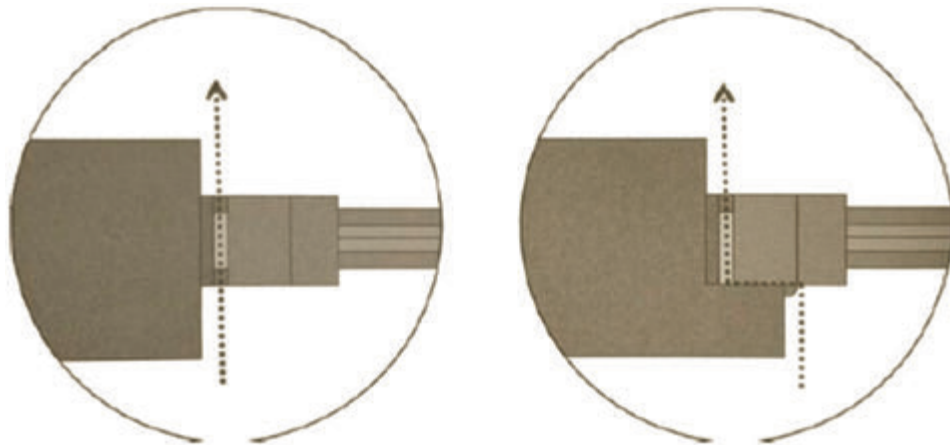


Fig. 11 | Posa in luce e a mazzetta sfalsata (la seconda migliora la risposta acustica)

da considerare sono quelli calcolati specificatamente e contenuti nel documento "relazione tecnica" (ex "relazione di conformità" alla Legge 10/1991), poi riportati nel capitolato. In questo caso la valutazione della prestazione termica dei serramenti, a livello di relazione tecnica, è eseguita puntualmente e non tenendo conto del metodo del serramento campione previsto dalla UNI EN 14351-1.

Il metodo della norma di prodotto stabilisce le dimensioni dei serramenti campione/normalizzati su cui eseguire il calcolo della trasmittanza termica e le regole di estensione dei risultati, che variano in funzione della superficie dei serramenti che devono essere rappresentati. È importante tenere in considerazione la morfologia del serramento, poiché il numero di ante influenza la prestazione termica, data l'incidenza dell'area di telaio sulla prestazione dei serramenti nel loro complesso.

La norma EN ISO 10077-1 fornisce la formula per il calcolo semplificato della trasmittanza termica del serramento che considera tutti i componenti, le loro caratteristiche geometriche e l'interazione tra essi (trasmittanza termica lineica dovuta agli effetti di bordo per la presenza del distanziatore del vetrocamera, il cui contributo è ottenuto con il calcolo numerico agli elementi finiti in accordo alla ISO 10077-2).

4.5 Isolamento acustico

L'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w (C; Ctr) è il parametro con cui i Fabbricanti del sistema esprimono il livello di prestazione dei serramenti di loro fornitura nell'ambito della marcatura CE. La norma di prodotto propone metodi di prova in laboratorio e di calcolo previsionali ai fini della sua valutazione.

Il riferimento legislativo per la verifica della prestazione acustica è il DPCM 5/12/1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici" che, però, stabilisce il valore limite riferito all'intera

prestazioni dipendono essenzialmente dalla connessione fisica e funzionale di componenti e materiali aventi caratteristiche diverse. La funzione di collegamento è affidata al giunto, che ricopre il ruolo di continuità; in particolare, lo sviluppo progettuale dei giunti (figura 12) in relazione alla situazione di installazione, deve garantire:

- la mitigazione dei ponti termici lineari e puntuali e ponti acustici;
- l'impermeabilizzazione all'aria lato interno;
- la protezione agli agenti atmosferici lato esterno;
- la compensazione delle variazioni dimensionali del vano di posa;
- l'efficacia dei sistemi di fissaggio in relazione ai carichi agenti;
- in generale, il mantenimento in opera delle prestazioni.

Dal punto di vista costruttivo, la progettazione del giunto comprende, quindi, lo studio dei tre piani funzionali (figura 13):

- piano di tenuta agli agenti atmosferici, verso l'esterno ha la funzione di "barriera" di protezione dalla pioggia, dal vento e l'acqua stagnante;
- piano di permeabilità all'aria interna dell'edificio, sul lato interno ha la funzione di impedire o regolare il passaggio interno-esterno di umidità interna, al fine di prevenire il rischio di formazione di condense interstiziali e superficiali e altri fenomeni degradanti il vano, i materiali di collegamento e il sistema;
- piano di isolamento termo-acustico e di fissaggio meccanico, in posizione intermedia deve contribuire all'isolamento termo-acustico e al trasferimento dei carichi al vano. Il fissaggio meccanico è funzione della tipologia del serramento, posizione nel vano di posa, morfologia del vano, etc.

Per quanto riguarda l'isolamento termico l'efficacia del giunto è determinata dal posizionamento del serramento all'interno del vano, dalle caratteristiche degli elementi di connessione e dalle caratteristiche e modalità d'impiego dei materiali di riempimento. La presenza e la non correzione dei ponti termici può determinare ricadute significative sugli aspetti energetici, igienico sanitari e di comfort. Alla formazione del ponte termico posso contribuire sia le disomogeneità geometriche del sistema di posa in opera, sia le disomogeneità materiche dei componenti, degli accessori e dei materiali di fissaggio, riempimento e sigillatura.

Mentre, per quanto concerne i criteri progettuali relativi all'isolamento acustico, è importante considerare che le prestazioni di isolamento acustico di un serramento sono fortemente influenzate dalla permeabilità all'aria. Dunque, è necessaria un'attenta valutazione nella scelta della tipologia di serramento e delle vetrazioni e delle giunzioni tra queste e il telaio, in quanto è chiaro che

Legenda

- 1 Giunto primario
- 2 Controtelaio
- 3 Giunto secondario
- 4 Telaio fisso
- 5 Anta

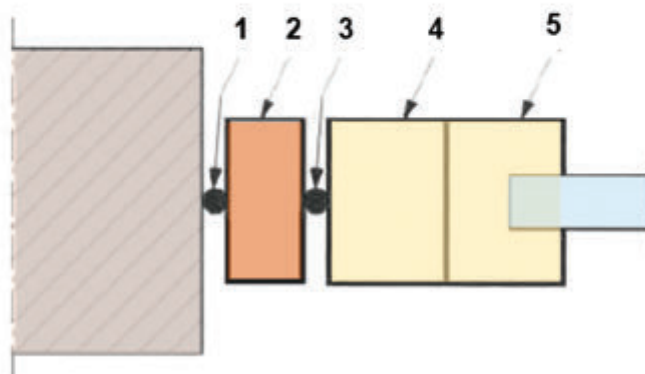


Fig. 12 | Giunto primario e secondario di un sistema infisso

l'esecuzione dell'interfaccia vano-serramento rappresenta una fase molto delicata. In particolare, alcuni criteri costruttivi da seguire riguardano:

- determinare la tipologia e le modalità costruttive della parete (operazione complessa in quanto le pareti perimetrali di un edificio presentano soluzioni costruttive che sono molto diversificate tra loro in funzione dei materiali, dei componenti utilizzati e delle tecniche realizzative);
- garantire sempre tre piani di tenuta: la presenza di una guarnizione centrale che garantisca una tripla battuta in modo da "ostacolare" il passaggio dell'aria;
- utilizzare nastri di tenuta ad elevata compressione;

Legenda

- Piano di tenuta agli agenti atmosferici
- Piano di permeabilità all'aria interna dell'edificio
- Piano di isolamento termico-acustico e di fissaggio meccanico

- 1 Esterno
- 2 Interno

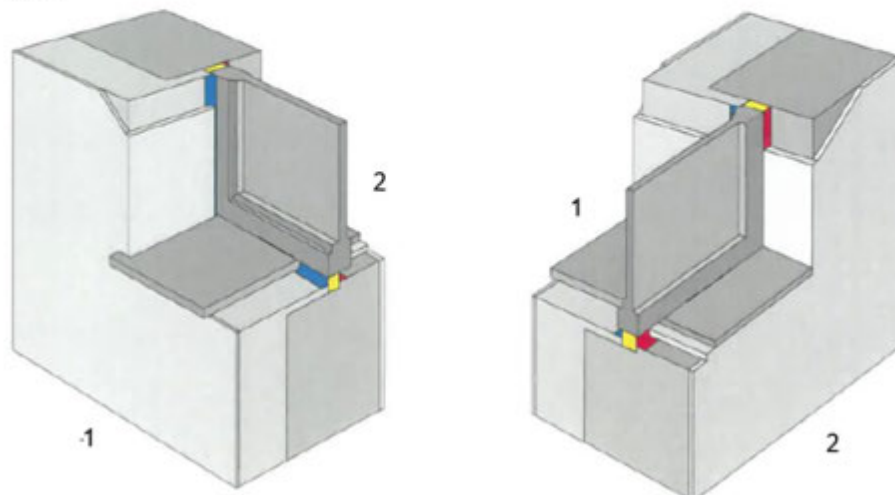


Fig. 13 | Rappresentazione schematica dei piani di tenuta (UNI 11673-1:2017)

- inserire materiali di riempimento ad elevata resistenza al flusso;
- impiegare materiali di sigillatura a basso modulo elastico: i sigillanti siliconici rispondono ottimamente a questo requisito.

I materiali di sigillatura, riempimento ed isolamento impiegati nella progettazione e realizzazione dei giunti di installazione dei serramenti devono garantire il soddisfacimento dei limiti prestazionali, specificati dalla norma UNI 11673-1 prospetto 3. Sono individuate diverse tipologie suddivise per ruolo funzionale: sigillanti, nastri autoespandenti, membrane e pellicole e schiume poliuretaniche. Il loro utilizzo deve essere funzione delle indicazioni specifiche del fabbricante del materiale/componente stesso. In particolare:

- nel caso di sigillanti fluidi devono essere garantiti i dimensionamenti minimi dei giunti prescritti dal fabbricante del materiale;
- nel caso di nastri autoespandenti devono essere garantiti i dimensionamenti, le modalità di realizzazione dei raccordi dei giunti angolari e le percentuali di espansioni all'interno dei range previsti dal fabbricante;
- nel caso di membrane, devono essere considerate le superfici di adesione e di conseguenza le caratteristiche d'incollaggio;
- nell'impiego di elementi di fissaggio meccanico, devono essere garantite tutte le modalità d'uso previste dalle specifiche indicate dal fabbricante del sistema.

La scelta del sigillante riguarda il tipo di giunto che si andrà a realizzare, il tipo di substrato su cui verrà applicato (alluminio, acciaio, vetro, muratura, pietra, legno, plastica, etc.), le sollecitazioni a cui sarà sottoposto il giunto e i requisiti che dovrà soddisfare in funzione dell'applicazione. La norma fornisce delle indicazioni a titolo indicativo relativamente alla compatibilità delle diverse tipologie di sigillanti ai diversi substrati.

I nastri autoespandenti vengono classificati in base alle loro caratteristiche prestazionali:

- BG1 adatto all'esterno (esposto ai raggi UV) anche sotto la pioggia battente (tenuta 600 Pa);
- BG2 adatto all'esterno (non esposto ai raggi UV) ma in posizione protetta (tenuta all'acqua 300 Pa);
- BGR complementare alle precedenti. Non adatto all'esterno, impermeabile all'aria e al vapore;
- Per la sigillatura del telaio al controtelaio sono indicati i nastri multifunzionali.

Per quanto riguarda le schiume poliuretaniche, il grado di riempimento delle cavità deve essere in funzione della post-espansione del materiale. I materiali di sigillatura e riempimento a contatto con l'ambiente interno devono essere dotati di specifica documentazione in materia di emissione di composti organici volatili. In particolare per sigillanti fluidi, schiume poliuretaniche e nastri autoespandenti devono essere documentabili i valori totali di composti organici volatili (TVOC secondo la UNI EN ISO 16000 - µg/mc).

6. L'integrazione dei serramenti nelle chiusure opache a secco

La complessità della progettazione e posa in opera del raccordo parete-infisso non deriva solamente dalla tipologia del sistema di

serramento ma anche dalla molteplicità di soluzioni costruttive che si presentano, oggi, per le pareti perimetrali e di chiusura d'ambito, che sono molto differenti tra loro sia per la funzione dei materiali impiegati, sia per la tecnica costruttiva e realizzativa del sistema che li caratterizza.

L'impiego di tecnologie a secco rappresenta attualmente un'importante innovazione tecnologica nella realizzazione dell'involucro edilizio, grazie alle loro caratteristiche di leggerezza e semplicità di posa, ottime prestazioni meccaniche, energetiche, acustiche e di sostenibilità. Con riferimento ai sistemi costruttivi posati su ossatura interna di tipo metallico, la continuità della tenuta rispetto agli agenti esterni ambientali deve essere realizzata anche in corrispondenza del vano serramento, quindi raccordando con attenzione gli strati di tenuta che non devono coinvolgere l'intercapedine interna della sottostruttura.

Le pareti di questo tipo sono, solitamente, composte da un'orditura metallica in acciaio ad elevata resistenza alla corrosione, che può essere semplice o doppia, e da un rivestimento comunemente con strati di lastre in cartongesso (o prodotto simile), posizionate sul lato interno, e lastre adatte all'esposizione all'esterno, come lastre di cemento e inerti, cemento rinforzato con rete in fibra di vetro sulle superfici, e altri compositi eventualmente intonacabili e/o rasabili. Nell'intercapedine realizzata dalle orditure sono inseriti materiali isolanti per conferire al sistema più alte prestazioni di isolamento termico e acustico. Tra paramento esterno ed orditura viene di solito interposto uno strato tecnico sotto forma di membrana con funzione di barriera all'acqua, freno al vapore oppure membrana traspirante alla migrazione del vapore.

Nella grafica riportata in figura 14, si rappresenta un esempio di studio di dettaglio di raccordo tra una parete di tamponamento a secco e un serramento in alluminio. Il serramento, con apertura a battente e ribalta, è composto da profili di alluminio estruso a taglio termico: il collegamento tra la parte interna e quella esterna dei profili è realizzata mediante listelli di poliammide. La guarnizione complementare di tenuta, inserita in una sede ricavata sul listello isolante, adotta il principio dinamico della precamera di turbolenza di grande dimensione (a giunto aperto). Sui telai, fissi e apribili, sono eseguite le lavorazioni atte a garantire il drenaggio dell'acqua attorno ai vetri e la rapida compensazione dell'umidità dell'aria nella camera di contenimento delle lastre. È presente un profilo fermavetro al fine di mantenere la lastra di vetro in posizione. Il sistema proposto, in questo caso, prevede il fissaggio del frangisole (schermatura esterna) direttamente al serramento, al fine di evitare forature della facciata a secco. Il serramento è raccordato alla facciata con un falso telaio in legno rinforzato con profilo metallico a C, attraverso un ancoraggio meccanico ad un profilo di supporto metallico. Il giunto (secondario) tra controtelaio e serramento è riempito con nastro autoespandente. La continuità della tenuta è garantita dalla presenza della guaina di protezione del controtelaio, con il risvolto della membrana di facciata. In sezione verticale è prevista l'impermeabilizzazione sotto davanzale, opportunamente pendenza e risvoltata.

Al fine di verificare la compatibilità prestazionale dell'involucro, quindi l'assenza di ponti termici e rischio di condensa superficiale e interstiziale, è stato condotto un calcolo termico analitico del serramento nell'interfaccia con il sistema di facciata (figura 15).

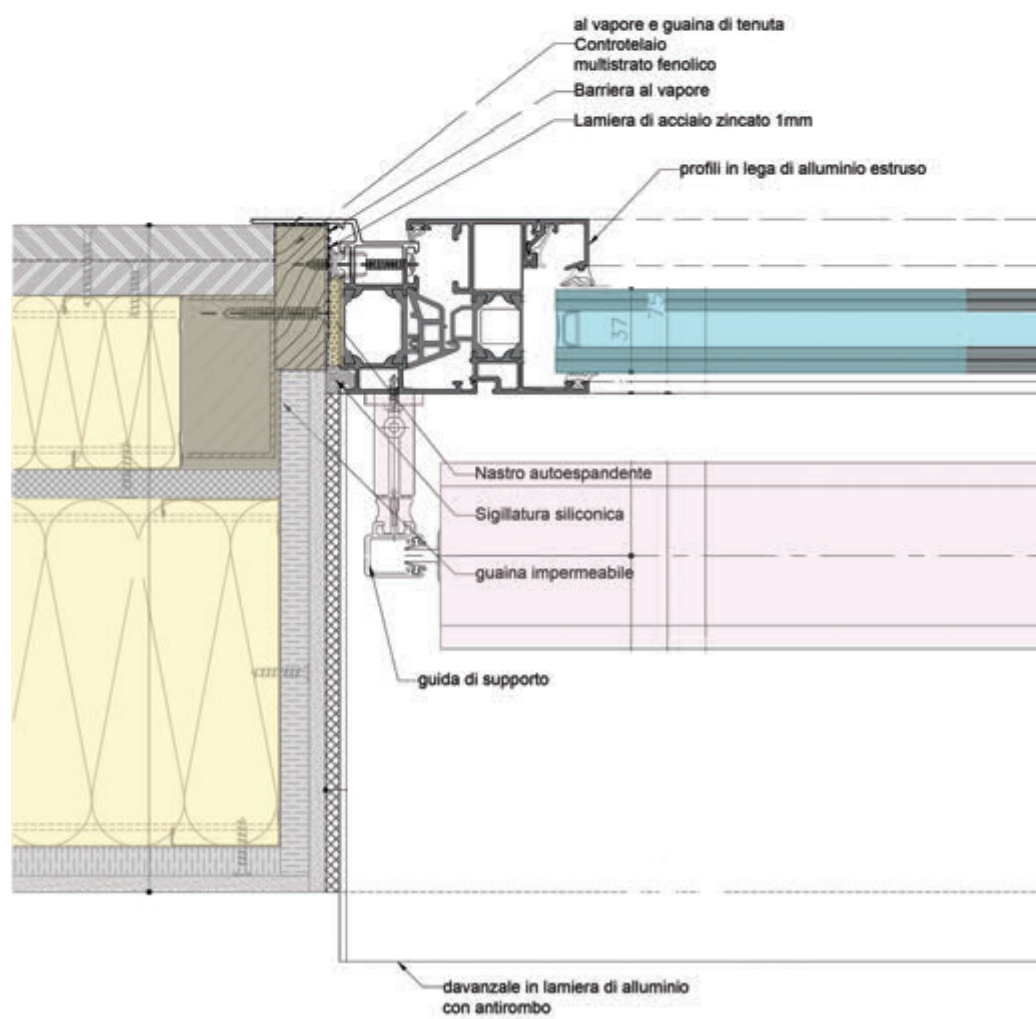
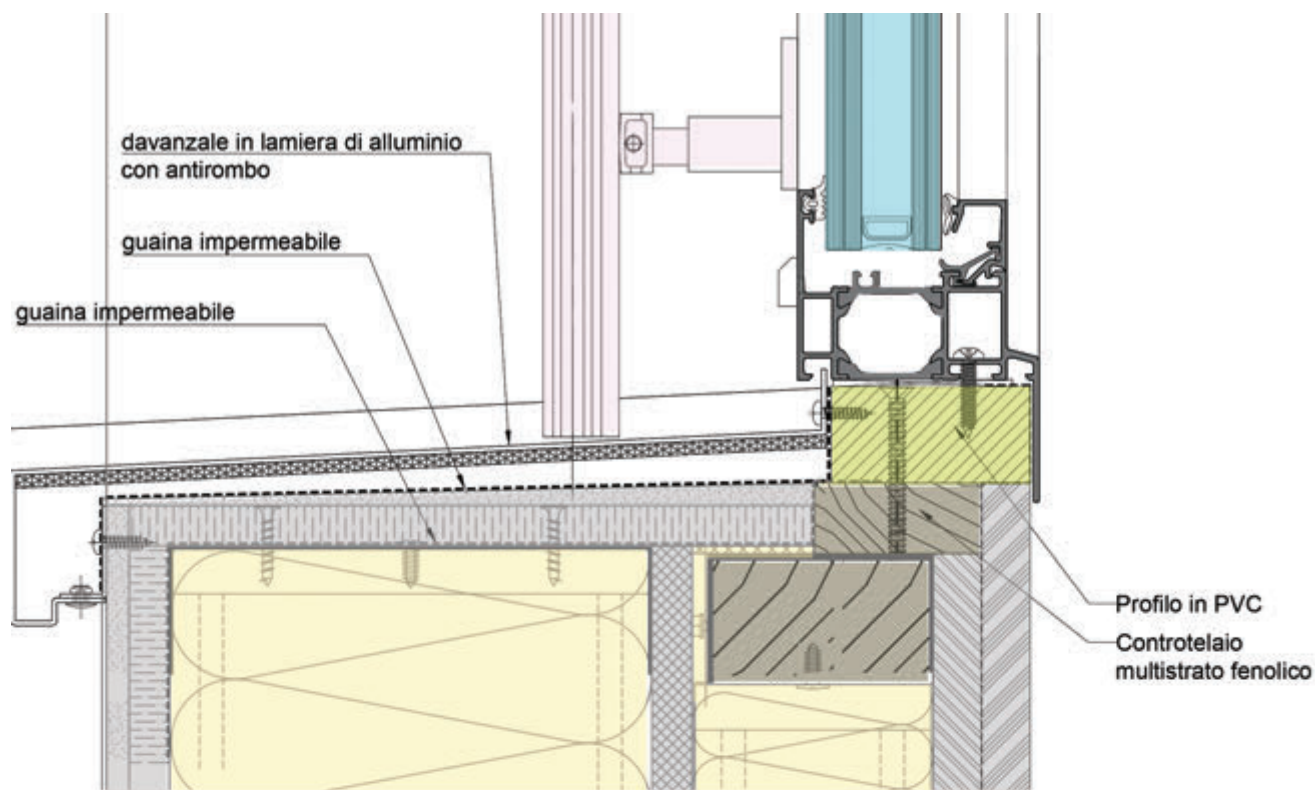


Fig. 14 | Nodo di raccordo laterale e inferiore serramento in alluminio - facciata a secco

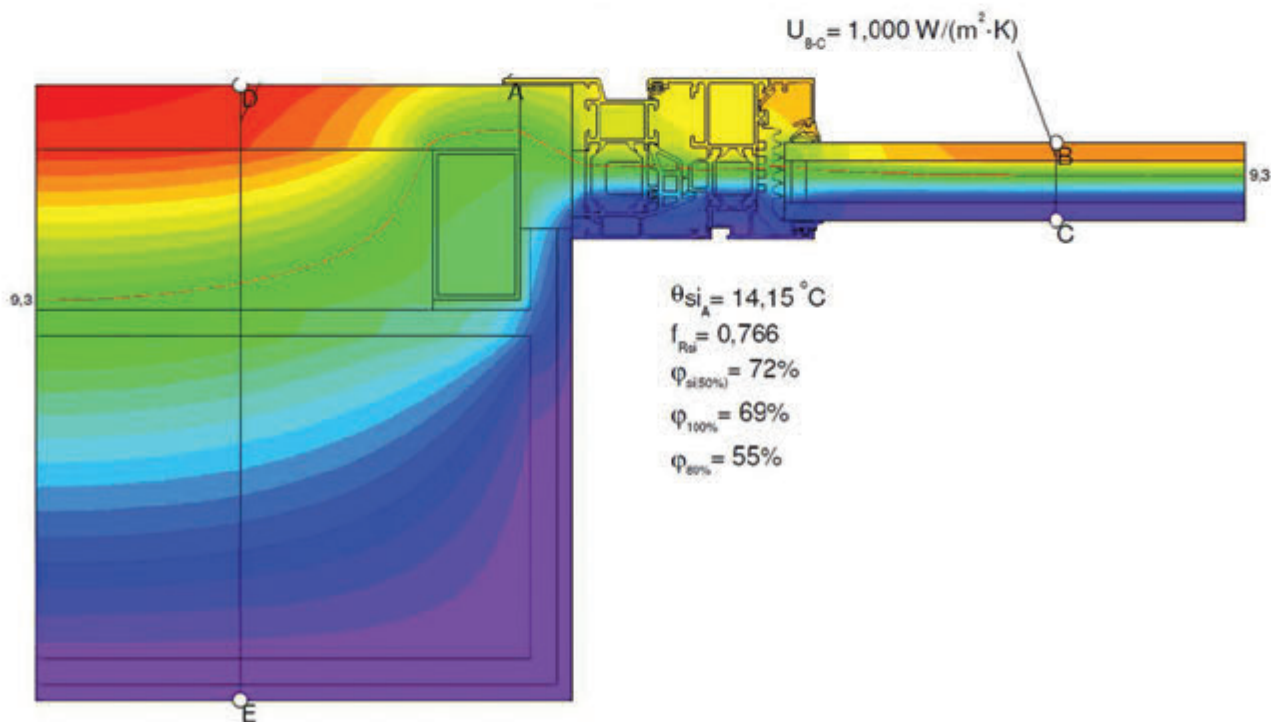
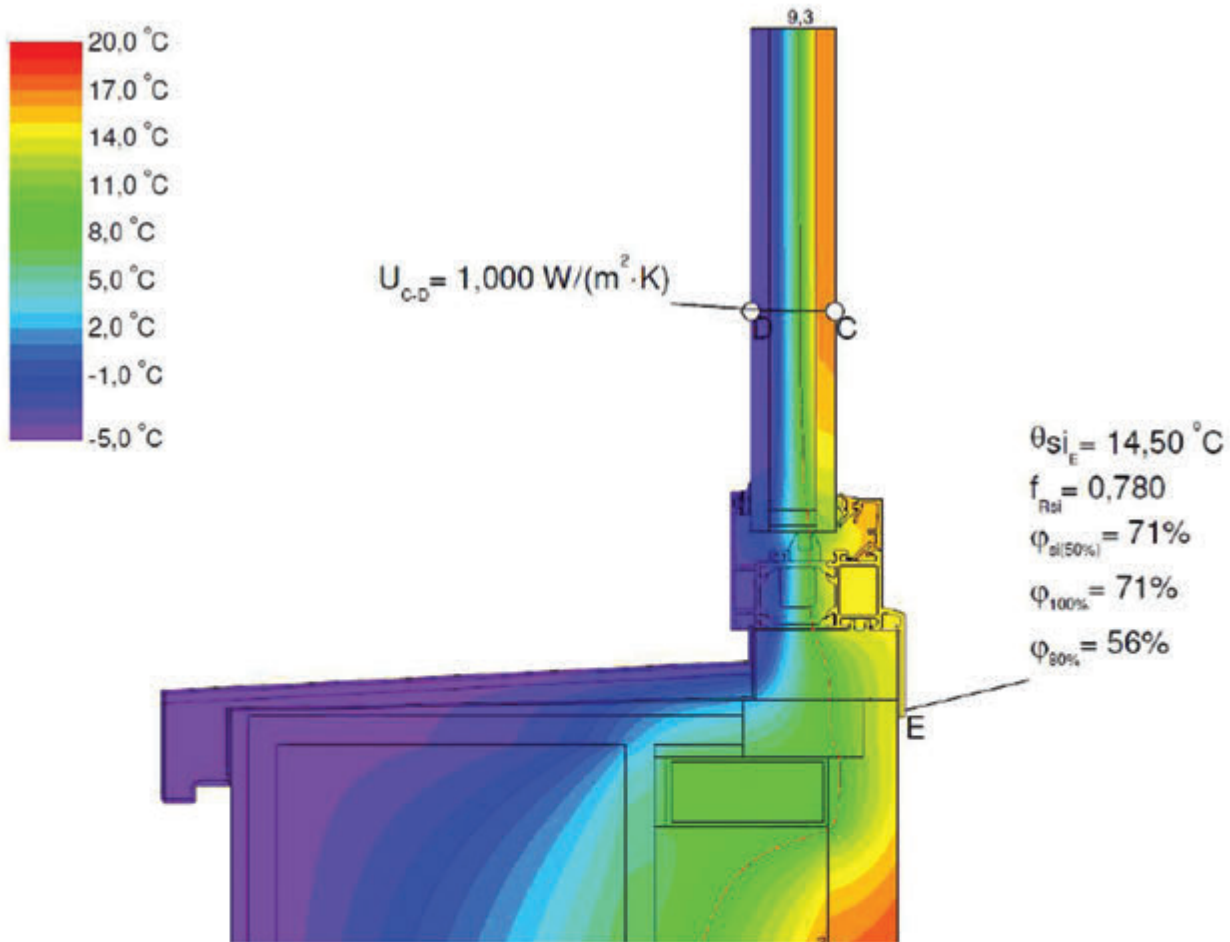


Fig. 15 | Profilo di temperature nel nodo serramento-involucro (analisi FEM) - viste in sezione

7. Verifiche qualitative e sperimentali della messa in opera

La valutazione delle prestazioni in opera può essere approfondita attraverso una serie di test sperimentali che vanno ad individuare eventuali criticità legate all'installazione di prodotti rispetto alle altre componenti edilizie presenti in sito. Nel seguito vedremo come le singole prestazioni possono essere esplorate, analizzate e verificate seguendo le indicazioni normative e di metodo disponibili in letteratura.

Gli aspetti riguardanti l'isolamento termico possono essere valutati tramite indagini termografiche che permettono di rilevare eventuali irregolarità termiche (ponti termici). La norma UNI EN 13187 contiene le informazioni, limitazioni e principali elementi di riferimento per la corretta esecuzione della prova di indagine termografica ed infrarosso. Le prove andranno eseguite nel rispetto di alcuni fattori, quali:

- Le specifiche e le potenzialità dell'apparecchiatura termografica (caratteristiche dello strumento e sensibilità);
- La conoscenza delle caratteristiche della struttura portante del fabbricato, del sistema costruttivo dell'involucro edilizio e del sistema di generazione, distribuzione ed emissione della climatizzazione invernale;
- Le proprietà radianti delle superfici con particolare riferimento ai materiali di rivestimento;
- I fattori climatici interni ed esterni: la misurazione delle temperature dell'aria interna ed esterna deve essere effettuata con accuratezza di +/- 1°C prima dell'inizio delle operazioni di verifica. In analogia alla verifica della temperatura devono essere registrate le variazioni riferite all'umidità dell'aria, oltre alle condizioni atmosferiche (nuvolosità, precipitazioni, vento);
- La certificazione del personale secondo UNI EN ISO 9712 risulta elemento prioritario per l'esecuzione della prova.

Le verifiche termografiche possono inoltre essere eseguite per localizzare eventuali infiltrazioni/perdite di aria attraverso i giunti di installazione e le discontinuità. In questo caso è necessario creare una differenza di pressione tra l'involucro edilizio e l'esterno: in quest'ottica, la differenza di pressione minima consigliata per poter evidenziare eventuali criticità è posta pari a 15 Pa.

La valutazione dell'isolamento acustico avviene con le modalità dettate dalla norma UNI EN ISO 16283:2016 "Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio", relativamente alla parte 3 "Isolamento acustico di facciata". La procedura per la misurazione dell'isolamento acustico per via aerea della facciata D2m,nT (metodo globale con altoparlante) tiene in considerazione i seguenti aspetti:

- La sorgente di rumore posta all'esterno della facciata e con angolo di incidenza stabilito dalla norma tecnica (distanza minima di 5 m dalla facciata e angolo di incidenza del suono pari a 45°);
- Il campo sonoro generato dall'altoparlante posizionato in campo libero è rumore rosa;
- Posizione del microfono esterno ed interno per le misurazioni L1 ed L2: una possibile procedura è quella di posizionare il microfono esterno ad una distanza di 2 m dalla facciata o di 1 m qualora siano presenti aggetti o balaustre mentre, il microfono

interno viene collocato in diversa posizione per eseguire più valutazioni del campo di misura in modo da non avere una griglia regolare né rilevamenti su di uno stesso piano parallelo ad una superficie dell'ambiente;

- I livelli di pressione sonora sono misurati in bande di terze di ottava (gamma di frequenze di misurazione comprese tra 100 e 3150 Hz);
- Misurazioni del tempo di riverberazione T (eseguita ad esempio con la tecnica impulsiva) e misurazione del rumore di fondo.

La verifica di permeabilità all'aria può essere eseguita in opera per quantificare le perdite di aria del sistema involucro attraverso il metodo di pressurizzazione mediante ventilatore, anche noto con il nome di Blower door test. Secondo la procedura di prova si sottopone l'ambiente di verifica ad una pressione positiva pari a 50 Pa, misurando contestualmente le perdite di sistema e quindi l'aria che filtra attraverso le discontinuità dell'involucro (eventualmente rilevando i principali punti di infiltrazione di aria mediante l'impiego di fumi traccianti). Il test permette di rilevare con precisione i punti di discontinuità presenti nell'involucro. La camera di tenuta che si realizza prendendo come riferimento un ambiente campione, può ulteriormente essere perfezionata o modificata con l'installazione di teli di plastica sigillati lungo il perimetro e che permettono le esclusioni di porzioni di facciata non oggetto di verifica. Il sistema è corredato da un dispositivo di misura delle pressioni interna ed esterna della camera di tenuta andando così a determinare la quantità di aria in entrata, che corrisponde alle perdite d'aria dovute alle discontinuità calibrata in relazione alle perdite parassite. La verifica della tenuta all'acqua del sistema involucro, è possibile attraverso due modalità di prova che prevedono la prima, l'irrorazione di acqua sulla superficie oggetto di verifica senza applicazione di differenziale di pressione mentre la seconda con applicazione di differenziale di pressione tra l'interno e l'esterno. La prima metodologia è spesso finalizzata al collaudo oppure all'indagine di cause di infiltrazioni da giunti o discontinuità, mentre la seconda è finalizzata alla verifica del mantenimento in opera delle prestazioni di tenuta all'acqua, per esempio dei serramenti o delle componenti poste in opera, rispetto ai valori dichiarati dal fabbricante.

In ultimo, la valutazione della caratteristica meccanica al carico vento e ai carichi agenti (es. antropico) è verificabile attraverso prove di carico sui manufatti oppure localmente, laddove sia di interesse comprendere il comportamento dei fissaggi meccanici del serramento. In quest'ultimo caso si ricorre a prove di estrazione, pull-out, oppure prove di spinta su staffaggi in funzione della tipologia di vincolo impiegato (per tipologia, e gerarchia).

Sono funzionali a questo tipo di indagine anche le verifiche visive di integrità delle connessioni, dello stato della coppia serraggio con controllo manuale (o con chiave dinamometrica) e anche le valutazioni documentali e descrittive del tipo di fissaggio, i report di calcolo con le indicazioni sull'interasse di posa e sul tipo di supporto.

8. Conclusioni

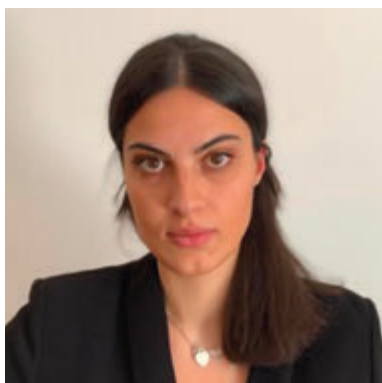
Gli approfondimenti tecnologici e procedurali discussi all'interno dell'articolo mettono in evidenza come la scelta di una tipologia di serramento sia dipendente da molteplici fattori, siano essi estetici, economici, tecnologico-prestazionali, di durabilità. Ogni materiale ha i suoi vantaggi e svantaggi, ma è bene considerare che questi aspetti devono essere valutati nel complesso del sistema, considerando tutti i suoi componenti e il contesto in cui essi vengono inseriti. Per quanto riguarda la morfologia e la scelta della tipologia di apertura, gli aspetti da considerare sono molteplici e riguardano sicuramente gli spazi a disposizione, la necessità di sfruttare la massima percentuale di luce, l'intenzione di avere sezioni molto snelle, oltre che garantire la sicurezza in uso e il raggiungimento delle prestazioni essenziali previste dalle guide

tecniche, regolamenti e norme di prodotto.

L'individuazione, la progettazione e l'analisi di questi aspetti deve strutturarsi nelle iniziali fasi del processo, quindi in tutte quelle valutazioni di carattere progettuale che vengono svolte agli albori dell'intervento che coinvolge questi sistemi. Lo studio dei dettagli di raccordo dei vani di apertura con le differenti tipologie e soluzioni costruttive possibili per l'involucro sono una fase importante per assicurare il raggiungimento dello standard qualitativo. Lo sforzo iniziato con la fase progettuale deve infine attenzionare la fase realizzativa di messa in opera, introducendo controlli e verifiche in campo, fino al raggiungimento della fase finale del collaudo e dei test in sito che possono mettere in evidenza ulteriori imprecisioni puntualmente individuabili come visto nei capitoli precedenti.

9. Bibliografia

- P.Rigone, L.Bianchi, V.Guerra, Serramenti e facciate continue in alluminio: l'involucro edilizio di qualità", Ingenio, anno 2021
- P.Rigone, P.Giussani, Sistemi costruttivi a secco per l'involucro edilizio: dai materiali alla progettazione integrata delle componenti Dry wall construction systems: materials and components through an integrated design approach, Costruzioni Metalliche, mar-apr 2021, ISSN n° 0010-9673, pp. 63-78
- L.Bianchi, Documento tecnico "Caratteristiche generali funzionali dei sistemi di apertura per i serramenti esterni", UNICMI
- F. Bonelli, Tesi di laurea "Progetto di restauro e conservazione di Torre Velasca. Inserimento di nuovi serramenti in un edificio storico vincolato", AA20/21
- P.Rigone, P.Giussani, Le caratteristiche prestazionali delle facciate continue: dalle verifiche in corso d'opera ai test di collaudo finali", Costruzioni Metalliche, gen-feb 2022, ISSN n° 0010-9673, pp. 44-60
- UX24, Aria acqua vento. Criteri di valutazione e scelta delle prestazioni ambientali dei serramenti esterni, UNICMI
- UX42, Guida alla posa in opera dei serramenti, UNICMI
- UX49, La marcatura CE di serramenti (finestre, portefinestre, porte esterne pedonali senza caratteristiche di resistenza al fuoco e tenuta ai fumi), UNICMI
- UX69, Acustica e involucro edilizio. Aspetti tecnici relativi a serramenti, facciate continue e ventilate, UNICMI
- Vasistas 5.2021, valutazione della trasmittanza termica dei serramenti. Metodo del serramento campione/normalizzato e criteri di estensibilità dei risultati secondo la norma di prodotto UNI EN 14351-1, UNICMI
- Vasistas 4.2023, valori limite di trasmittanza termica e di fattore solare totale dei serramenti. Il Decreto Requisiti Minimi del 26 giugno 2015, UNICMI
- UNI 12519:2018 "Finestre e porte pedonali - Terminologia"
- UNI 14351-1:2016 "Finestre e porte - Norma di prodotto, caratteristiche prestazionali - Parte 1: Finestre e porte esterne pedonali"
- UNI EN 12488:2016 "Vetro per edilizia - Raccomandazioni per la messa in opera - Principi di posa per vetrate verticali ed inclinate"
- UNI 11173:2015 "Serramenti esterni e facciate continue - Criteri di scelta delle caratteristiche prestazionali di permeabilità all'aria, tenuta all'acqua e resistenza al carico del vento"
- UNI 10077-1:2018 "Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità"
- UNI 11673-1:2017 "Posa in opera di serramenti - Parte 1: Requisiti e criteri di verifica della progettazione"
- UNI 11673-4:2021 "Posa in opera di serramenti - Parte 4: Requisiti e criteri di verifica dell'esecuzione"



Francesca Bonelli

Laureata in Ingegneria dei Sistemi Edilizi nel 2021 presso il Politecnico di Milano con una tesi dal titolo «Progetto di restauro e conservazione di Torre Velasca. Introduzione di nuovi serramenti in un edificio storico vincolato». È iscritta all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano. Dal 2021 collabora con lo Studio di Ingegneria Rigone, con attività legate al supporto della progettazione preliminare, definitiva ed esecutiva e assistenza alla direzione lavori in interventi relativi all'involucro edilizio. In particolare, ha collaborato allo sviluppo di importanti progetti, attraverso il supporto nella produzione di dettagli costruttivi, redazione di relazioni specialistiche e report di calcolo, con particolare riferimento alle analisi delle performance di facciate e sistemi costruttivi a secco.



Paolo Giussani

Laureato in Ingegneria dei sistemi edilizi presso il Politecnico di Milano, è iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano. Collabora con l'ufficio tecnico UNICMI svolgendo attività di consulenza nel settore delle facciate continue e dei serramenti, supporto alle attività di progettazione e costruzioni, assistenza tecnica e consulenza alla predisposizione di gare d'appalto, redazione di capitolati speciali di natura prestazionale per involucro opaco, serramenti metallici, coperture vetrate, facciate continue e facciate ventilate. Nel 2014 inizia una proficua collaborazione con Studio di Ingegneria Rigone svolgendo il ruolo di Façade Engineer nelle attività legate alla progettazione, direzione lavori e consulenza in materia di involucro edilizio. Si occupa di audit ed expediting presso aziende produttrici di sistemi di facciate continue, vetrerie e prove di laboratorio. Dal 2016 è cultore della materia al corso di progettazione dell'involucro edilizio, laurea magistrale in ingegneria dei sistemi edilizi presso il Politecnico di Milano.



Paolo Rigone

Laureato in Ingegneria Civile nel 1989 presso l'Università degli Studi di Pavia, è iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Pavia dal 1990. Dottore di ricerca in ingegneria ergotecnica edile presso il Politecnico di Milano nel 1995. Dal 2007 è Professore associato di Architettura Tecnica presso il Politecnico di Milano e titolare della cattedra di Progettazione dell'involucro edilizio presso la Facoltà di Ingegneria Edile-Architettura. Dal 1989 è partner di Studio di Ingegneria Rigone e dal gennaio 2000 è direttore tecnico di UNICMI - Unione Nazionale delle Industrie delle Costruzioni Metalliche dell'Involucro e dei serramenti. Esperto in materia di tecnologie dell'involucro edilizio con particolare riferimento al settore delle facciate e della tecnologia dell'involucro edilizio. È attivo in diverse commissioni e gruppi di lavoro normativi, sia a livello nazionale che internazionale, alla definizione delle norme tecniche con particolare riferimento al settore dell'involucro edilizio. È autore e co-autore di numerose pubblicazioni scientifiche in materia di tecnologia dell'involucro, edilizia ospedaliera, gestione dei processi edilizi, manutenzione e qualità in edilizia, project management, applicazione delle norme ISO 9000, gestione qualitativa di microambienti ospedalieri, controlli sulla patologia dei sistemi edilizi.

Pergola fotovoltaica: struttura reversibile in acciaio per la produzione di energia da fonte rinnovabile

Photovoltaic shade: reversible steel structure for the renewable energy production

Arch. Tecla Caroli* | Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle costruzioni e Ambiente Costruito

Il progetto Photovoltaic Shade è un ottimo esempio dell'impegno dell'architetto Ignacio Borrego nella progettazione sostenibile. Integrando l'uso di energia solare negli ambienti urbani in modo esteticamente gradevole ed efficiente, Borrego ha creato una soluzione che affronta le diverse sfide associate agli obiettivi di decarbonizzazione del settore delle costruzioni.

The Photovoltaic Shade project is a relevant example of the architect Ignacio Borrego's commitment to sustainable design. By integrating the use of solar energy into urban environments in an aesthetically pleasing and cost-effective manner, Borrego has created a solution that addresses several challenges associated with the widespread adoption of solar power.



*Corresponding author. E-mail address: tecla.caroli@polimi.it

Neutralità climatica e spazi urbani

La Commissione Europea ha fissato l'obiettivo di raggiungimento della Neutralità Climatica entro il 2030. Si richiede infatti, che l'emergenza climatica venga affrontata all'interno delle città con il coinvolgimento dei cittadini, intesi come utenti, produttori, consumatori e proprietari degli immobili. Le città sono il luogo in cui coesistono e si intersecano le strategie di decarbonizzazione dell'energia, dei trasporti, degli edifici e persino dell'industria e dell'agricoltura. Raggiungere 100 città neutrali dal punto di vista climatico entro il 2030 è l'obiettivo individuato dal Mission Council per le città climaticamente neutrali e intelligenti (100 Climate Neutral and Smart Cities). Per portare avanti la missione fissata dalla Commissione Europea, 100 città degli Stati membri dell'Unione Europea e 12 città dei Paesi associati sono stati selezionati e supportati per il raggiungimento di tale obiettivo. Tra queste, ritroviamo anche la città di Madrid.

Considerando il contesto normativo e strategico in cui il progetto si colloca, l'architetto Ignacio Borrego ha declinato gli obiettivi di decarbonizzazione all'interno del proprio progetto con lo scopo di ridurre l'utilizzo delle risorse e contribuire ad un impatto positivo sull'ambiente. Si tratta quindi di una struttura sostenibile a livello ambientale, sociale ed economico, che non trascura gli aspetti estetici e tecnologici dell'architettura.

Tale approccio si traduce all'interno del progetto attraverso scelte progettuali specifiche rispetto alle tecnologie utilizzate. Al fine di ridurre gli impatti di carbonio, il sistema è progettato per produrre energia elettrica da fonte rinnovabile, limitare la richiesta energetica da rete e produrre energia pulita anche per altri edifici limitrofi. Inoltre, la struttura mira alla circolarità delle risorse attraverso l'impiego di un materiale completamente riciclabile, come l'acciaio, e grazie all'impiego di tecniche costruttive reversibili che, a fine vita, consentono lo smontaggio e l'eventuale rimontaggio di tutti gli elementi in altri luoghi, la possibilità di immettere le risorse disponibili in altri cicli di vita.

Architettura e produzione di energia da fonte rinnovabile

Negli ultimi anni, l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili è diventato un tema di ricerca importante a causa delle crescenti preoccupazioni per i cambiamenti climatici e della necessità di ridurre le emissioni di carbonio. Una delle fonti più promettenti di energia rinnovabile è l'energia solare, il cui impiego ha registrato una rapida crescita negli ultimi anni. Tuttavia, l'adozione diffusa dell'energia solare è stata ostacolata da diversi fattori, tra cui gli alti costi di installazione e la limitata disponibilità di terreni adatti per le fattorie solari. Per affrontare queste sfide, Ignacio Borrego, architetto e designer, ha proposto il progetto "Photovoltaic Shade", che mira a integrare i sistemi per lo sfruttamento dell'energia solare all'interno di aree urbane, in modo economico ed esteticamente gradevole. La pergola proposta è stata progettata per essere posizionata sulla copertura dell'edificio in cui è collocato l'ufficio dell'architetto, con lo scopo di creare non solo un elemento tecnologicamente efficiente ma anche uno spazio di aggregazione ombreggiato, per far fronte al forte irraggiamento che caratterizza la capitale spagnola.



Fig. 1 | Pergola Fotovoltaica - vista dall'alto © Miguel de Guzmán



Fig. 2 | Pergola Fotovoltaica - vista copertura © Ignacio Borrego

Tecnologia e sostenibilità

Il progetto consiste in una pergola, progettata e costruita come struttura aggiuntiva all'esistente, con lo scopo di migliorare le prestazioni energetiche attraverso un approccio sostenibile e

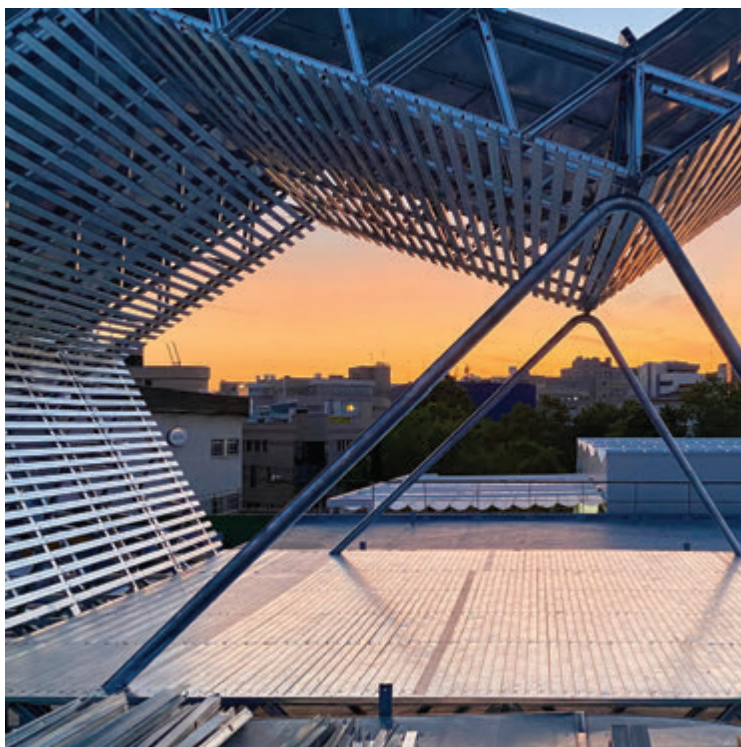


Fig. 3 | Pergola Fotovoltaica - vista al tramonto © Ignacio Borrego



Fig. 4 | Dettaglio struttura 1 © Miguel de Guzmán

circolare. In tal senso, la scelta di soluzioni costruttive reversibili che consentano lo smontaggio e il riuso dei sistemi, facilita i processi di riduzione dei rifiuti a fine vita e di riuso o riciclo dei componenti e dei materiali, in linea con le politiche e le strategie a sostegno dell'efficienza ambientale e dell'economia circolare.

Il progetto è mosso dalla consapevolezza che nei prossimi anni il settore delle costruzioni sarà chiamato a confrontarsi diffusamente con il problema degli interventi di rigenerazione e riqualificazione all'interno di tessuti urbani consolidati, che possono trarre grande vantaggio da soluzioni leggere, basate sull'assemblaggio a secco e che consentono, inoltre, una significativa riduzione dei tempi, dei costi e delle dimensioni del cantiere.

In tal senso, le soluzioni in acciaio possono risultare estremamente efficaci nella realizzazione di interventi finalizzati alla riqualificazione di edifici esistenti al fine di migliorarne anche le prestazioni energetiche. La leggerezza e l'elevata prefabbricazione delle soluzioni di acciaio, favorite da un elevato rapporto resistenza/peso del materiale, limitano i disagi dovuti al trasporto degli elementi strutturali e ne favoriscono l'inserimento nelle costruzioni esistenti, riducendo al minimo le operazioni da effettuarsi in cantiere e facilitando conseguentemente la messa in opera. Inoltre, le strutture in acciaio riescono ad ottenere prestazioni tra le più performanti in termini di resistenza al fuoco e di resistenza agli agenti esterni per le diverse destinazioni d'uso, per tale motivo risulta il più adatto per sistemi posizionati all'esterno.

I sistemi assemblati con connessioni meccaniche e costituiti da materiali completamente riciclabili, favoriscono l'applicazione di strategie circolari, attivando operazioni che sfruttano le risorse a disposizione e concretizzano il concetto di ciclicità della vita (Life Cycle Design) di un sistema edilizio. L'assemblaggio a secco, unitamente alla selezione di materiali riciclabili, costituisce una modalità costruttiva che consente di ottimizzare le prestazioni di un prodotto considerando nel loro insieme le fasi di produzione, di costruzione e d'uso, sia sul fronte degli aspetti ambientali, come ad esempio con l'impiego di materiali a basso impatto (come i materiali con contenuto di riciclato e riciclabili), sia sul fronte degli aspetti economici, attraverso un investimento iniziale per le tecnologie utilizzate, che determinano l'aumento del valore del prodotto grazie ai benefici generati nel tempo (riuso della pergola, produzione di energia elettrica), grazie all'estensione del loro ciclo di vita.

La pergola fotovoltaica in profilati sagomati a freddo

Il progetto nasce dalla necessità di generare energia elettrica per l'ufficio sede dello studio di architettura dei progettisti stessi. L'elettricità generata dai pannelli (8,19 kWp), grazie al alto rendimento, è capace di soddisfare il fabbisogno energetico dello spazio (ufficio) e di essere sfruttata anche in altri spazi, come gli appartamenti dello stesso edificio. In caso di sovrapproduzione rispetto al fabbisogno, l'energia può essere immagazzinata mediante batterie di accumulo.

La struttura è costituita da elementi in acciaio prefabbricato e modulari, poggia sugli unici quattro punti possibili, che erano stati previsti sul tetto per future installazioni ed è realizzata con profili piegati a freddo in acciaio zincato. Per il suo assemblaggio è stato necessario saldare due tubi circolari curvi di acciaio da



Fig. 5 | Dettaglio struttura 2 © Miguel de Guzmán



Fig. 6 | Vista Copertura © Miguel de Guzmán

70 mm in grado di resistere alle sollecitazioni dovute al vento trasferendo i carichi ai quattro punti di appoggio. Il resto della struttura è costituito da profili leggeri avvitati in loco e assemblati senza bisogno di mezzi ausiliari. Il montaggio ha richiesto solo sei settimane e la struttura è totalmente reversibile in quanto tutti i giunti sono rimovibili e gli arredi mobili.

Tecnologia ed estetica

La struttura in acciaio lasciata a vista è simbolo di un'estetica industriale di cui edifici e strutture, come il Beaubourg a Parigi (1977), di Renzo Piano e Richard Rogers, si fanno portavoce. Considerando il progetto citato come riferimento, risulta significativo l'intento degli architetti di trattare l'architettura come un organismo che mostra i suoi componenti nascosti, come la struttura. Si tratta di una scelta progettuale che rivela lo scheletro dell'architettura, portando alla luce i sistemi tecnologici che, nella maggior parte dei casi, sono coperti da altri elementi costruttivi, come ad esempio tamponamenti e rivestimenti. L'azione di lasciare a vista e allo stato grezzo gli elementi strutturali celebra questi ultimi come tratti distintivi ed essenziali, che contribuiscono all'identità dell'architettura, rendendola un riconoscibile all'interno di un contesto fortemente urbanizzato

Peculiarità del progetto risulta la realizzazione di una struttura tecnologicamente avanzata per la collocazione dei pannelli fotovoltaici su di un edificio esistente e la creazione di un elemento architettonico fruibile alle persone ed esteticamente raffinato.

La volontà di lasciare a vista la struttura senza alcun rivestimento richiede un'attenta progettazione dei dettagli che riguarda sia gli elementi lineari e che i sistemi di connessione. Il controllo degli aspetti formali della pergola, dalle dimensioni dei singoli elementi alla generazione di spazi per le persone, si confronta con la verifica degli aspetti strutturali e tecnologici relativamente alla resistenza meccanica e fisica degli elementi stessi, interfacciandosi

a sollecitazioni determinate dal clima e dalle persone.

Nel progetto, l'estetica e la tecnologia collaborano traducendo una richiesta di tipo funzionale, come quella di produrre energia elettrica, ad una necessità formale e sociale progettando una pergola in acciaio multifunzionale e integrata al contesto urbano.

Multifunzionalità e integrazione urbana

La pergola prevede un design modulare che può essere facilmente personalizzato per adattarsi a diversi ambienti. Le strutture di ombreggiamento sono progettate per essere leggere e facilmente installabili, con una gamma di dimensioni, colori e configurazioni diverse per adattarsi a spazi con funzioni differenti.

I pannelli sono realizzati con materiali leggeri come l'alluminio e sono



Fig. 7 | Area coperta multifunzionale © Miguel de Guzmán



Fig. 8 | Montaggio piattaforma di sostegno © Ignacio Borrego



Fig. 9 | Montaggio sottostruttura pannelli 1 © Ignacio Borrego



Fig. 10 | Montaggio sottostruttura pannelli 2 © Ignacio Borrego



Fig. 11 | Completamento montaggio sottostruttura pannelli 1 © Ignacio Borrego

progettati per integrarsi facilmente al contesto senza generare un impatto negativo all'ambiente circostante, potenzialmente personalizzabile con una gamma di colori e finiture differenti.

Tale sistema è stato ben accolto dai cittadini e ha suscitato un notevole interesse da parte degli urbanisti e dall'amministrazione comunale, richiedendo la costruzione di tale struttura in altre aree della città. Il progetto è stato infatti proposto anche in parchi, piazze pubbliche e nodi di trasporto (piazzole di sosta, aree di servizio) Sempre all'interno della città di Madrid.

È evidente che il progetto presenti elementi di indubbio interesse dal punto di vista economico, estetico e della sostenibilità ambientale.

Sul versante economico, esso propone una soluzione per sfruttare l'energia solare negli ambienti urbani,



Fig. 12 | Completamento montaggio sottostruttura pannelli 2 © Ignacio Borrego

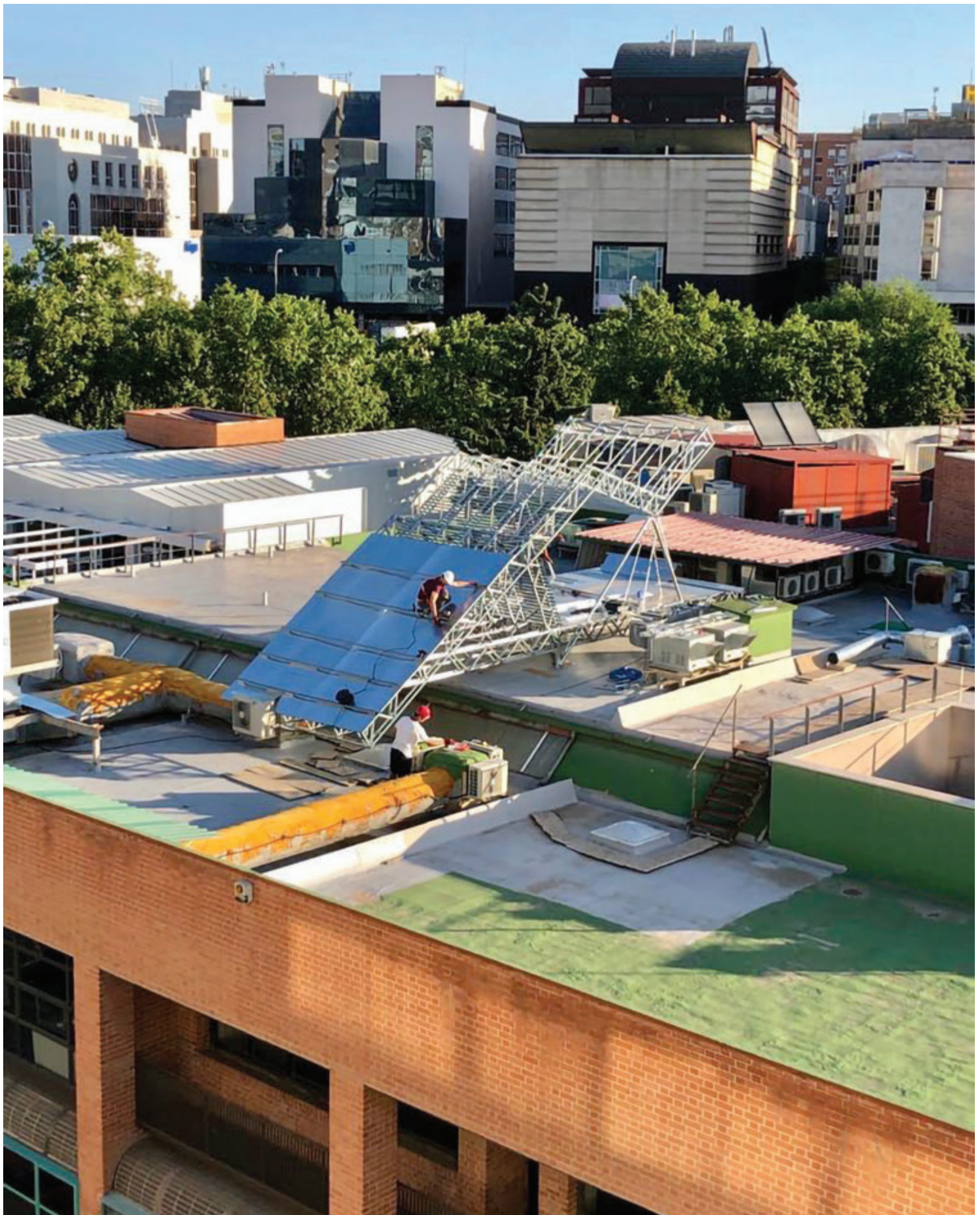


Fig. 13 | Montaggio pannelli © Ignacio Borrego

attraverso un sistema integrato all'esistente evitando interventi di demolizione o ristrutturazione che comporterebbero tempistiche e costi maggiori. Il design modulare consente, inoltre, una facile personalizzazione e installazione, riducendo il costo complessivo delle possibili implementazioni nel tempo. Sul fronte estetico, le strutture ombreggianti sono progettate per essere gradevoli, con una gamma di colori e finiture tra cui scegliere. In particolare, oltre all'acciaio che caratterizza la struttura, l'area coperta è attrezzata con una piattaforma in legno su cui poggiare gli arredi urbani, quali sedie e/o tavoli. Inoltre, la multifunzionalità del progetto lo rende adatto ad essere installato in diversi ambienti urbani, tra cui parchi, piazze pubbliche e cortili.

Sul versante della sostenibilità ambientale il progetto promuove l'uso di energia da fonte rinnovabile e riduce le emissioni di carbonio in fase operativa. L'elettricità generata dai pannelli può essere utilizzata per alimentare gli edifici vicini o reimmessa nella rete, contribuendo alla sostenibilità complessiva dell'ambiente urbano. La selezione dei materiali riciclabili e dei sistemi costruttivi a secco permettono l'applicazione di strategie circolari per il riutilizzo delle risorse a disposizione e riducono le emissioni di carbonio in fase di produzione, costruzione e fine vita.

Il design modulare, l'economicità e l'estetica rendono progetto del Photovoltaic Shade di Ignacio Borrego una proposta che tenta di affrontare in modo innovativo la necessità di promuovere la produzione e l'uso di energia da fonte rinnovabile all'interno delle aree urbane, non limitando il problema a una dimensione eminentemente tecnologica e puntando decisamente ad una inedita sperimentazione funzionale ed estetica.

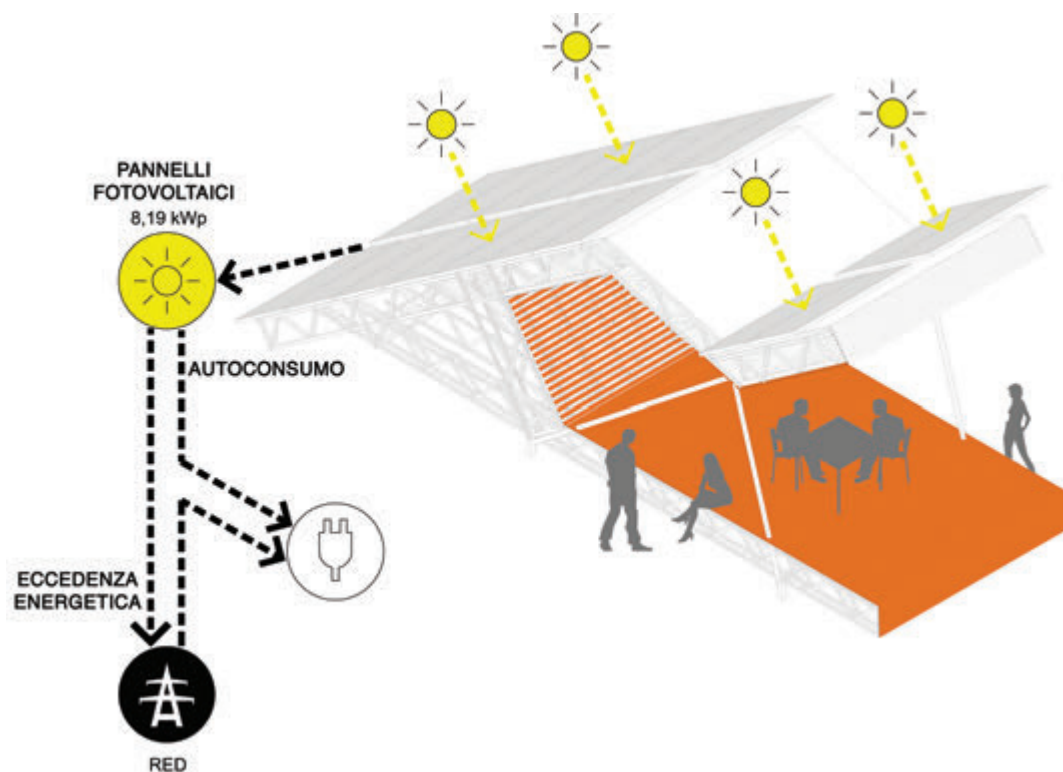


Fig. 14 | Schema funzionale © Ignacio Borrego

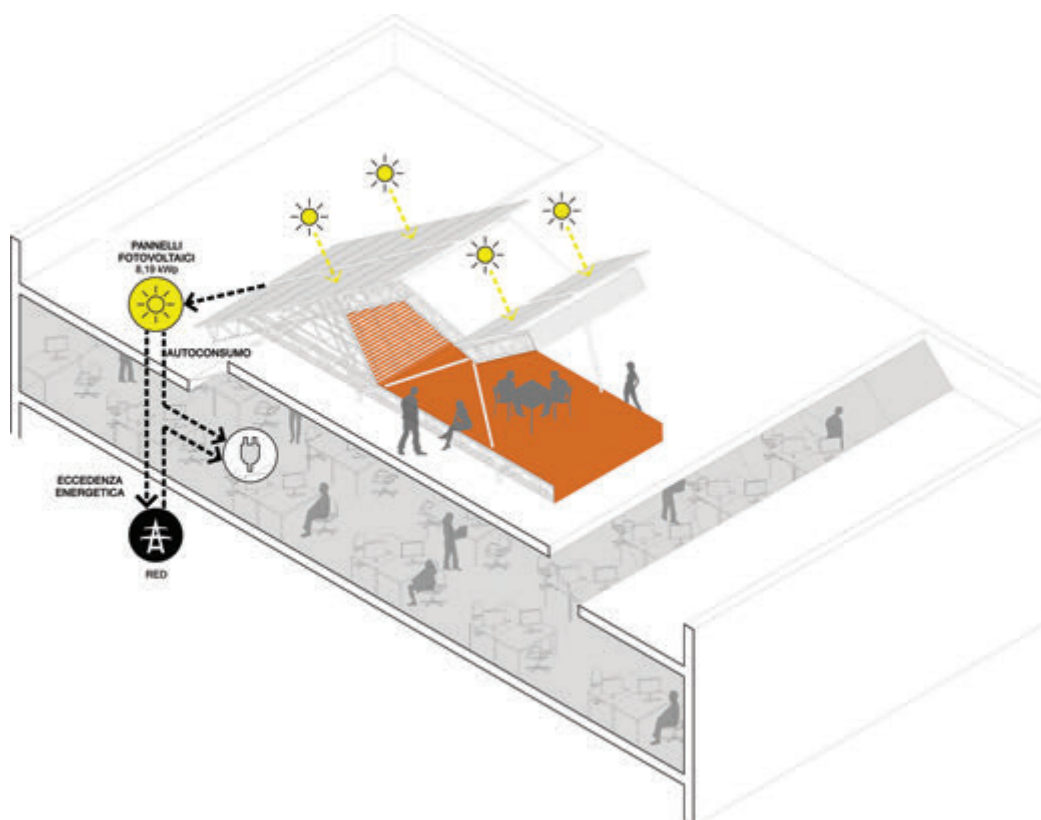


Fig. 15 | Assonometria sistema © Ignacio Borrego

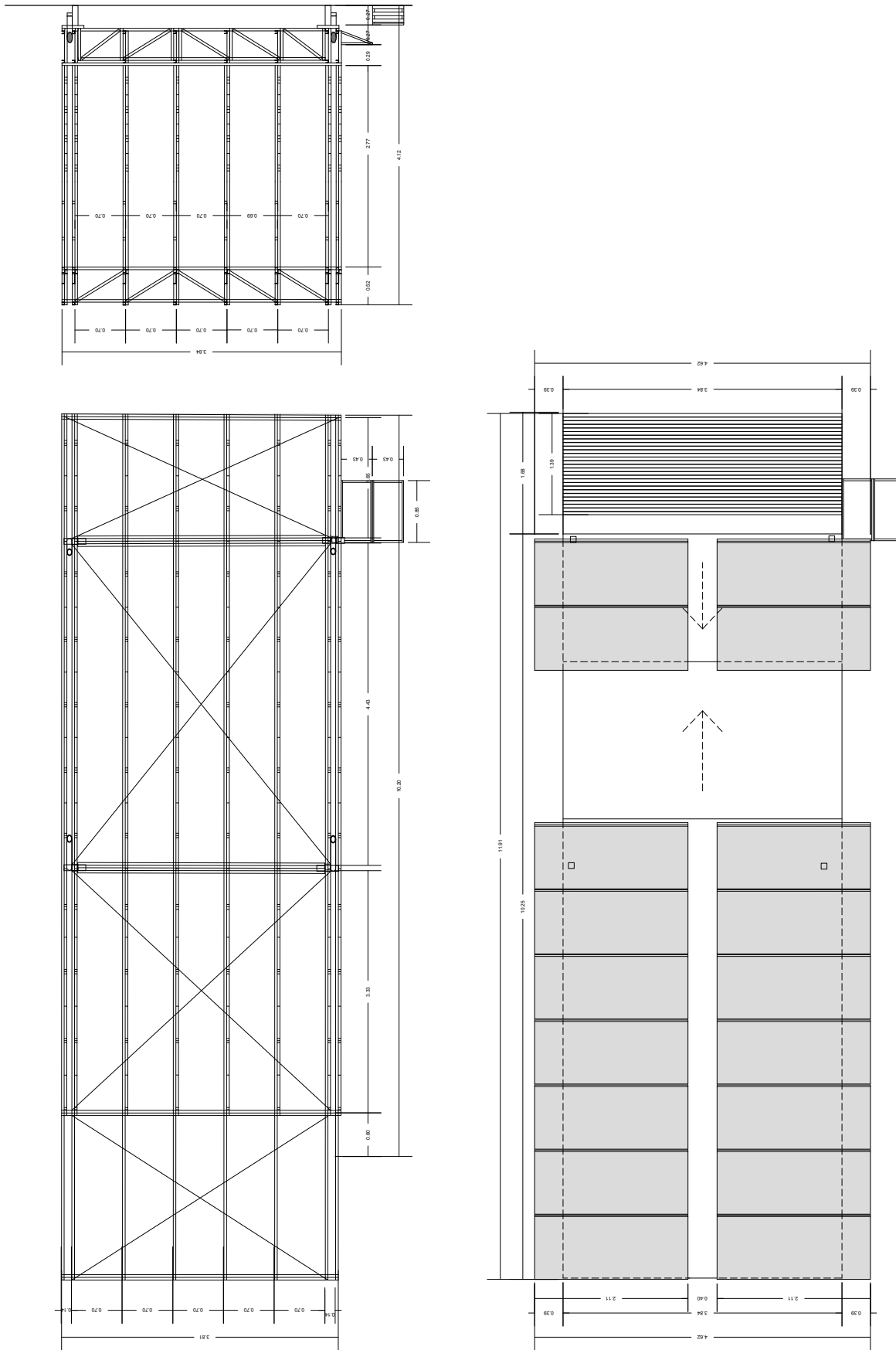


Fig. 16 | Pianta © Ignacio Borrego

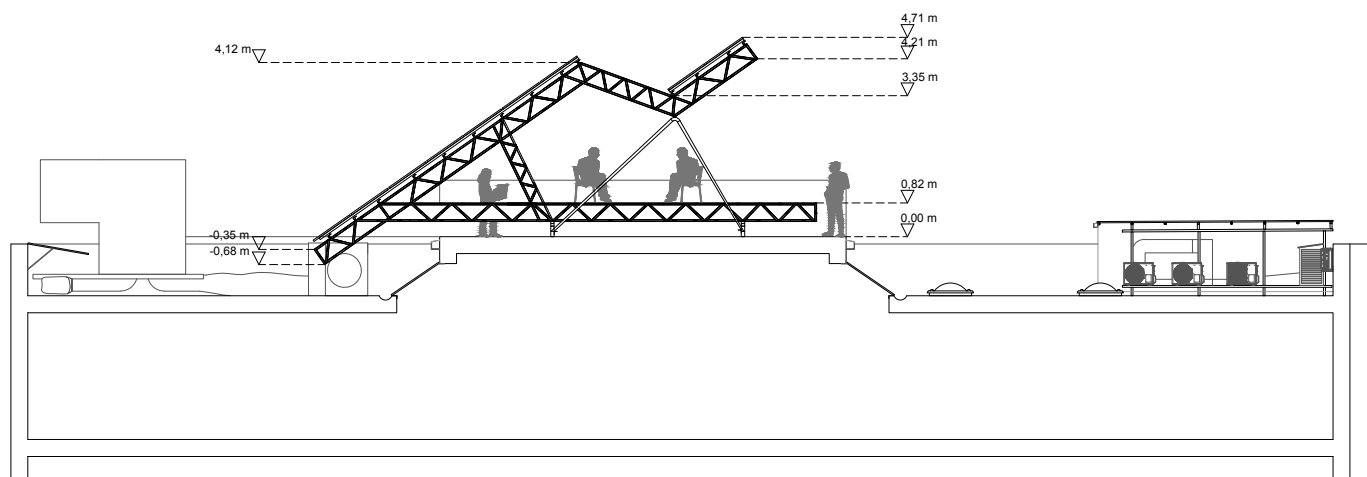


Fig. 17 | Sezione® Ignacio Borrego

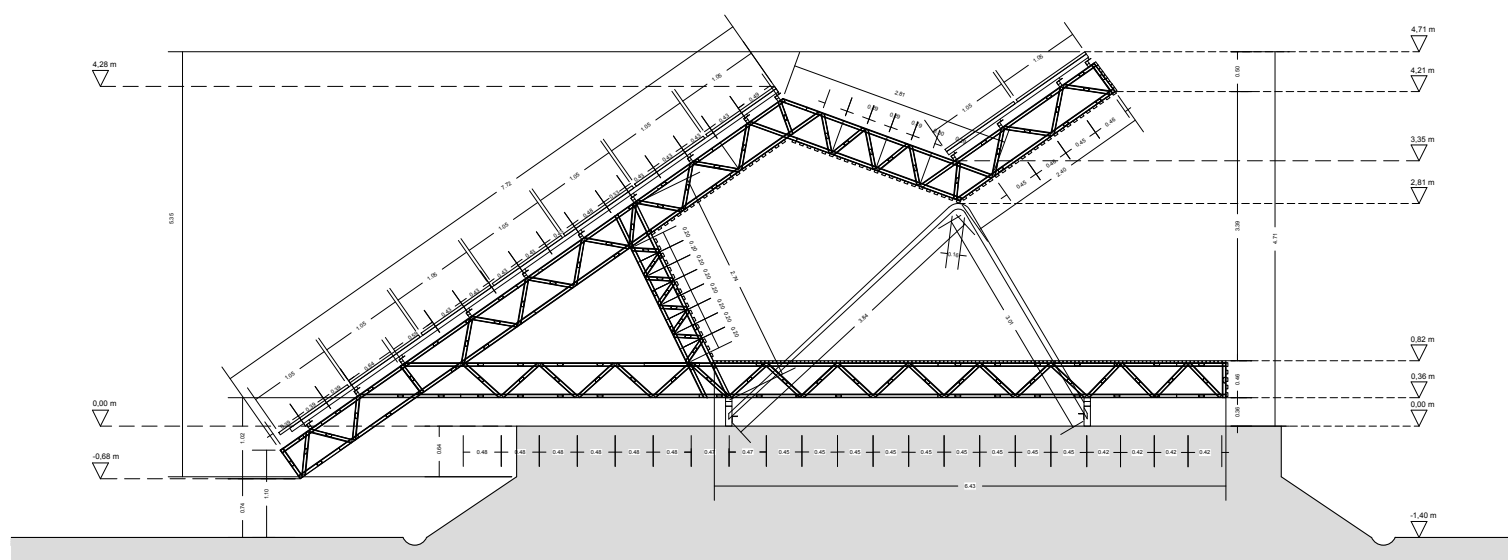


Fig. 18 | Sezione struttura® Ignacio Borrego

Dati di Progetto

Luogo:	Madrid, Spagna
Tipologia edificio:	nuova costruzione
Progetto e Costruzione:	2021
Superficie:	55 m2 (area d'ombra 25 m2)
Destinazione:	Pergola fotovoltaica
Budget:	12500 €

Credits

Committente:	Tasvalor
Architettura:	Ignacio Borrego (www.ignacioborrego.com)
Costruzione:	Ignacio Borrego Arquitectos Ignacio Borrego, Federica Masia, Federico Arca Sedda, Gonzalo Rivera, Héctor Turuhpial y Jonander Rodríguez
Strutture:	Ignacio Borrego Arquitectos
Impianto fotovoltaico:	Lodeal Energía

Si ringrazia l'architetto Ignacio Borrego per la documentazione cortesemente messa a disposizione.



Tecla Caroli

Architetto e PhD ottenuto presso il Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito del Politecnico di Milano, con una tesi dal titolo

“Reverso: reversible technologies towards reusing, remanufacturing and recycling”. Assistente di Corsi di Laurea Triennale e Magistrale su temi riguardanti tecnologia dell'architettura, sostenibilità ambientale ed economia circolare. Autrice di diverse pubblicazioni su temi affini alla sua ricerca di dottorato e su progetti sviluppati durante la sua professione. Attualmente Consulente di Sostenibilità presso ARUP.

L'involucro stratificato a secco: la pelle delle strutture in acciaio

Dry layered casing: the skin of steel structures

Ing. Mirko Berizzi*, Direttore Tecnico Vanoncini SpA

I sistemi costruttivi stratificati a secco, ormai consolidati nel mondo dell'edilizia, consentono di progettare e realizzare svariate soluzioni di involucro perimetrale (e indoor) adeguandosi a tutte le esigenze progettuali: architettonico/materiche, geometriche, prestazionali, logistiche e di budget. Soluzioni di involucro che si sposano perfettamente con i vantaggi e l'essenza delle strutture portanti in acciaio sia laminate a caldo che presso-piegate a freddo meglio definite LFS (Light Frame Steel).

Now consolidated in the building world, dry stratified construction systems allow the design and creation of various perimeter envelope solutions adapting to all planning needs: architectural/material, geometric, performance, logistics and budget. Envelope solutions that blend perfectly with the advantages and essence of both hot-rolled and cold-press-bent steel load-bearing structures, better defined as LFS (light frame steel).



Fig. 1 | Esempi di edifici con involucro S/R dal 1990 al 2018

*Corresponding author. Email: m.berizzi@vanoncini.it

La Tecnologia costruttiva a secco

La prima tecnica costruttiva adottata dall'uomo fin dall'antichità è stata la tecnologia stratificata a secco, che si è evoluta nel tempo passando dalle prime palafitte alle fachwerk del XV secolo, fino all'avvento del ferro, della ghisa e dell'acciaio, materiali che ci

hanno condotto ai nostri giorni, dove costruire a secco è diventata una tecnica sempre più raffinata.

Molto diffuse nel nord Europa e nelle aree anglofone, da diverso tempo le strutture a secco, definite in termini accademici come Sistemi "Struttura e Rivestimento" (S/R), vengono utilizzate anche nel nostro Paese, poiché esse permettono grande libertà dal punto di vista architettonico, possiedono ampie potenzialità strutturali e consentono di raggiungere grandi performance energetiche e acustiche sia nelle nuove edificazioni che in interventi di ampliamento, riqualificazione e adeguamento del patrimonio esistente.

Concettualmente questo metodo è molto semplice in quanto consiste nella creazione di un'ossatura portante a telaio in acciaio (laminato a caldo, presso-piegato a freddo, ibrido, etc.) e nella sua successiva chiusura d'involucro attraverso stratificazioni di materiali senza utilizzare acqua nel processo di assemblaggio.

Per meglio comprendere il sistema possiamo pensare ad una sorta di "matrioska" (figura 2) con un guscio esterno, a cui è demandata la funzione di definizione architettonica dell'involucro, di protezione dall'ambiente e di resistenza alle sollecitazioni esterne, e un guscio interno che definisce lo spazio abitabile, garantendo la qualità estetica e le migliori condizioni di benessere e comfort. Nel mezzo

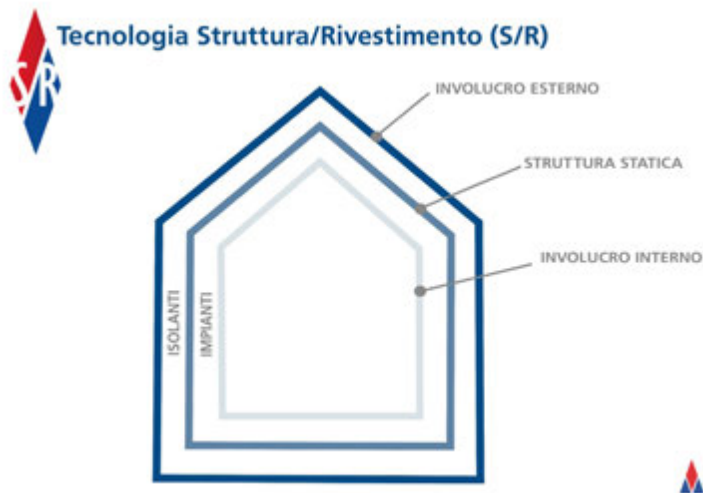


Fig. 2 | Schema del sistema "a matrioska" della tecnologia costruttiva a secco



Fig. 3 | Esempi di stratificazioni costruttive a secco

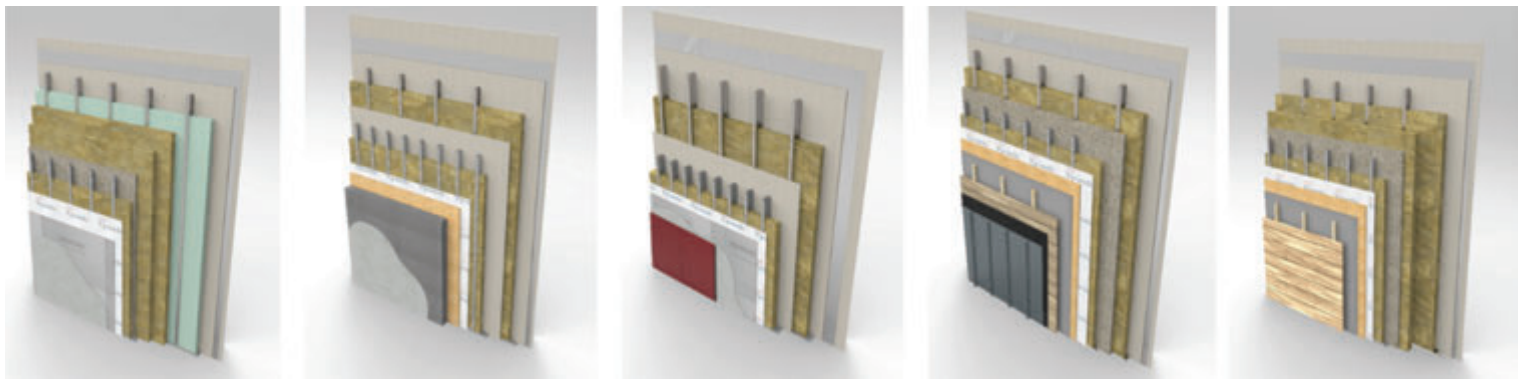


Fig. 4 | Pacchetti verticali di involucro S/R con differenti finiture

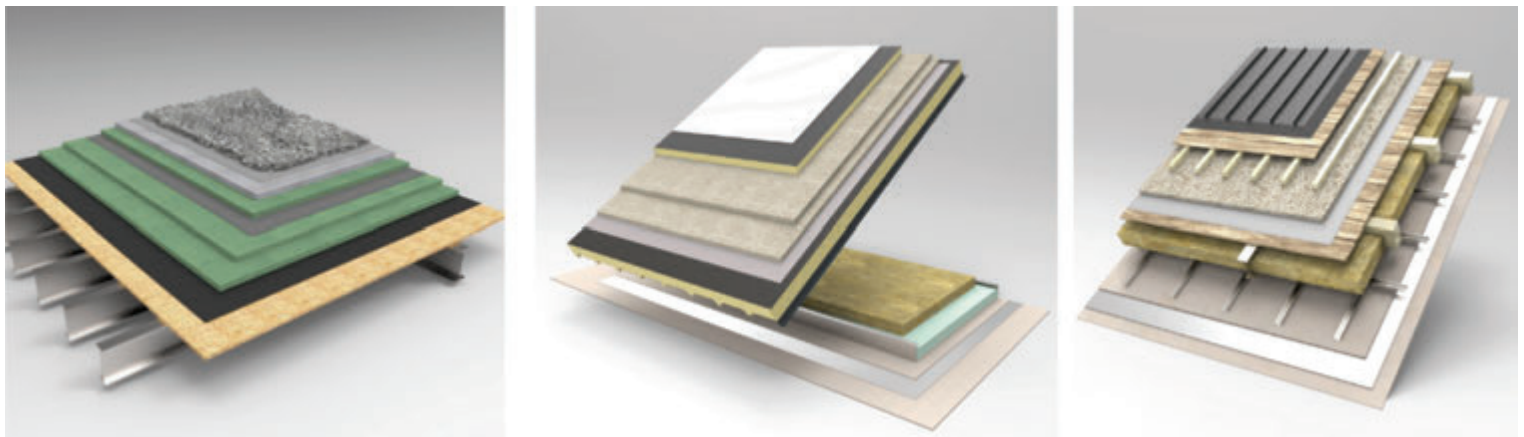


Fig. 5 | Pacchetti orizzontali e di copertura di involucro S/R con differenti finiture

dei due strati si presentano le strutture statiche, gli isolamenti e i cavetti impiantistici. È necessario inoltre sottolineare che il layer esterno e quello interno sono desolidarizzati e applicati ciascuno su di una orditura metallica leggera indipendente, solitamente in lega di zinco/magnesio all'esterno e in acciaio zincato all'interno. Il metodo costruttivo S/R assembla dunque strati funzionali al singolo progetto, attentamente valutati dal punto di vista fisico-tecnico e garantiti da un processo di produzione controllato in fabbrica, il quale riduce la realizzazione di prodotti sul cantiere e facilita l'assemblaggio degli stessi componenti in opera (figura 3). La progettazione dettagliata ed integrata, la scelta di materiali di qualità e un estremo rigore nelle fasi di montaggio portano infatti ad una ingegnerizzazione del cantiere tale da conoscere in anticipo costi e tempi di realizzazione dell'immobile e individuare i suoi consumi energetici a divenire. La tecnologia stratificata a secco rappresenta un metodo costruttivo

“trasversale”, se non universale, in quanto consente di utilizzare differenti soluzioni d'involucro (figura 1) - che possono essere anche combinati tra di loro in sistemi ibridi - per qualsiasi tipo di edificio, dalle case unifamiliari alle grandi strutture commerciali, alberghiere e industriali.

I Vantaggi

La Tecnologia stratificata a secco sta entrando nella maggior parte della tipologia di progetti e cantieri grazie e numerosi vantaggi prestazionali e operativi, quali:

- Prestazione termica: una parete assemblata con struttura a secco possiede un valore di trasmittanza termica molto più preformante rispetto a un elemento opaco massivo (a pari spessore occupato) in virtù della possibilità di inserire numerosi strati di materiale isolante.



Fig. 6 | Involucro S/R della nuova sede del Politecnico di Milano a Bovisa – Milano 2015/16

- Resilienza statica e antisismica: i sistemi a secco possiedono una elevata “resilienza”. In caso di eventi sismici, simulati in laboratorio, grazie alla loro leggerezza (con pesi di 1/3 - 1/4 di una tradizionale muratura massiccia), alla conformazione strutturale e ad una opportuna messa in opera tollerano oscillazioni sismiche rilevanti senza crollare. Per questo motivo il sistema costruttivo a secco è determinante nella scelta tecnologica di tutte le partizioni non portanti perimetrali e interne di ogni tipologia di edificio (scuole, ospedali, uffici, residenze).
- Fonoassorbimento e fonoisolamento acustico: proprio in considerazione della possibilità di giustapporre materiali coibenti di diversa fisionomia e densità (legge massa-molla-massa), gli indici di isolamento dei sistemi stratificati a secco sono sempre molto performanti.
- Protezione passiva dal fuoco: la resistenza al fuoco è una caratteristica intrinseca delle lastre a base gesso, ingrediente principe della tecnica S/R. Le prestazioni offerte dal sistema coprono tutte le richieste normative variando da R-EI 60 a R-EI 180, a seconda della tipologia di stratificazione adottate in spessori di pacchetto estremamente contenuti.
- Leggerezza: le soluzioni stratificate a secco permettono di abbattere i costi per le opere di fondazione, di scavo e di getto. Non dimentichiamo infine che la leggerezza degli elementi agevola notevolmente la logistica operativa di cantiere e di conseguenza i costi fissi degli operatori.
- Rapidità di montaggio: in considerazione della pianificazione che contraddistingue la realizzazione delle strutture S/R dalla progettazione alla consegna del manufatto finito, le fasi di montaggio possiedono un elevato livello di programmazione con conseguente riduzione dei tempi di assemblaggio e parallelamente e statisticamente del rischio infortuni.
- Riutilizzo dei materiali: un edificio stratificato a secco può



Fig. 7 | Involucro S/R della nuova sede del gruppo Kasanova - Arcore (MI) 2015/16

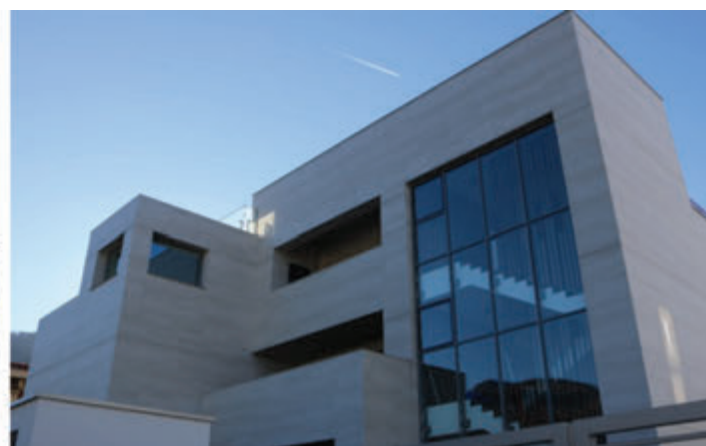


Fig. 8 | Involucro S/R della palazzina plurifamiliare “Residenza degli ulivi” - Iseo (BS) 2017



Fig. 9 | Involucro S/R di una residenza unifamiliare - Almenno San Bartolomeo (BG) 2017

essere smontato a distanza di tempo recuperando la stragrande maggioranza dei materiali adottati, reimmettendoli nei cicli di produzione e di realizzazione di un altro edificio.

- Libertà architettonica: tutti i vantaggi sopra elencati e la “trasversalità” della Tecnica costruttiva a secco permettono di ottimizzare e mixare al meglio tutti gli elementi per soddisfare qualsiasi forma e geometria architettonica.
- Economicità di gestione: il risparmio è dovuto a 3 aspetti; innanzitutto la velocità di costruzione intrinseca alla tecnologia stratificata a secco che ottimizza i costi d’impresa con un processo di cantiere fluido e pulito in continuo assemblaggio; in secondo luogo la gestione nel tempo dell’involucro abitato che grazie alle performance dello stesso e alla semplificazione della quota parte impiantistica necessaria riduce ai minimi i costi di gestione; in terzo luogo la semplicità di manutenzione/integrazione/modifica delle dotazioni impiantistiche grazie alla “accessibilità” dell’involucro e dei cavedi previsti negli edifici realizzati a secco.

L’Involucro degli edifici stratificati a secco

Il pacchetto di involucro perimetrale di un edificio stratificato a secco è solitamente composto da un guscio esterno (c.parete esterna) e da un layout interno (c.parete interna) desolidarizzati tra di loro per ospitare le strutture portanti, le dorsali impiantistiche e per esigenze prestazionali termo acustiche.

Il guscio esterno è composto da pannelli fibro-cementizi applicati su



Fig. 10 | Involucro S/R del sopralzo del palazzo residenziale Art Building - Milano zona Greco Pirelli 2017/18

orditura metallica a C verticale in lega di zinco magnesio (spessore 0,6-0,8 mm e passo ad interassi di 30/40 cm), con coibentazione termica sia in luce all’orditura metallica, sia – possibilmente – “a cappotto esterno” con intonaco/rasatura finale.

Il layout interno prevede profili montanti in acciaio zincato (spessore 0,6 mm passo solitamente 60 cm) con isolante interposto a supporto di una doppia lastra di gesso rivestito con barriera al vapore al centro e finitura.

Nelle intercapedini tra le due c.pareti perimetrali dell’involucro sono collocate ulteriori stratigrafie di lastre e/o materiali coibenti e capacitivi.

Gli ingredienti del pacchetto di involucro sono molteplici e costituiscono uno dei grandi vantaggi della stratificazione (figura 4). Infatti i materiali scelti possono rispondere alle principali richieste di sostenibilità di processo e di produzione ovvero elementi progettati per un ciclo di vita che prevede il loro disassemblaggio e successivo riciclaggio finale a costi limitati. L’infinita varietà dei componenti permette di effettuare combinazioni differenti a seconda degli obiettivi progettuali richiesti (figura 3).

Ad esempio i livelli di performance energetica e ambientale del pacchetto sono strettamente legati ai materiali utilizzati per realizzare gli isolamenti dell’involucro, siano essi sintetici come EPS/XPS, poliuretani, stratificati quali i termoriflettenti, o naturali/ecologici quali fibra di legno, canapa, lana di roccia, lana di legno mineralizzata e fibra di poliestere. La scelta degli ingredienti può essere effettuata anche in funzione di altri parametri: il ciclo di vita (LCA) del singolo strato oppure in base al livello di emissione di VOC di ogni singolo componente (figure 13-14).

Le finiture materico/architettoniche dei due layer perimetrali posseggono caratteristiche ben differenti

Il guscio esterno dovrà resistere alle intemperie e agli agenti atmosferici. Qui c’è la possibilità di scegliere una grande varietà di materiali di rivestimento – possibilmente leggeri – in grado di attribuire alla facciata un aspetto architettonico ben definito.

Soluzioni con finiture ad intonaco, con rivestimento metallico, con rivestimento ligneo naturale, con sistemi di facciata modulare, con effetti lapidei sono oramai consolidate; ogni tipologia ovviamente deve prevedere la progettazione del sistema di ancoraggio e della modularità di rivestimento (figure 6-10).

La pelle interna invece dovrà garantire ottimi livelli di comfort termo-igrometrico indoor, attraverso materiali a base gesso quale volano igrotermico ai quali aggiungere le prestazioni specifiche

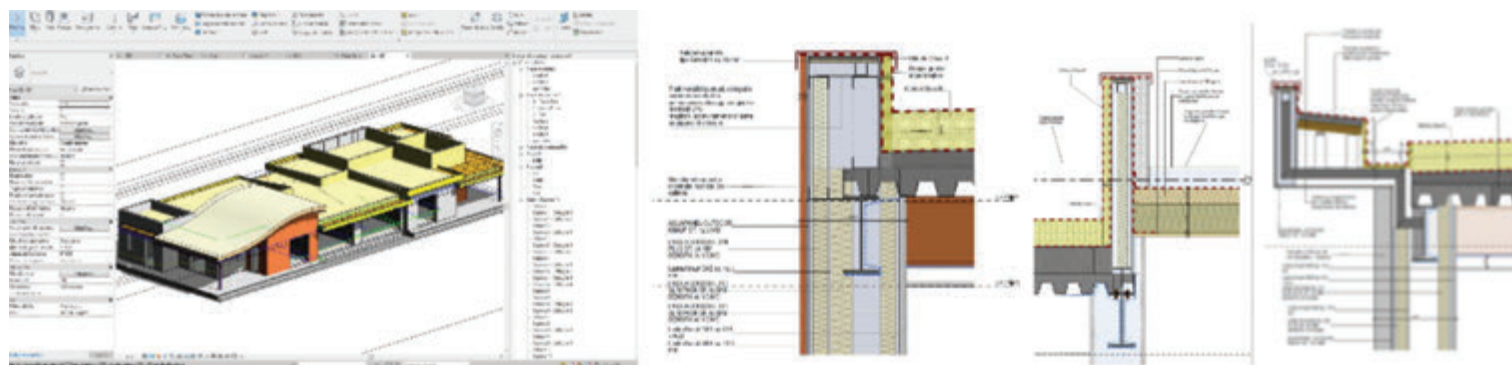


Fig. 11 | _Modellazione BIM e relativi dettagli costruttivi dell’involucro S/R di una residenza bifamiliare - Calusco d’Adda (BG) 2016/17



Fig. 12 | Immagini di cantiere delle fasi di assemblaggio del sistema S/R post modellazione BIM - Calusco d'Adda (BG) 2016/17

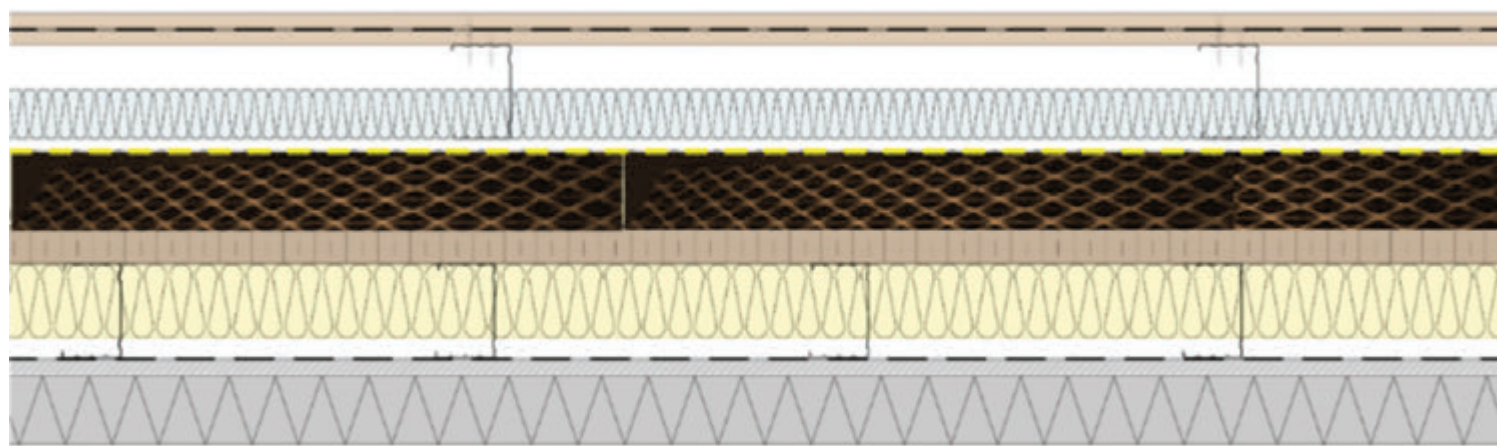


Fig. 13 | Pacchetto d'involucro S/R con iperisolante alveolare termoriflettente Actis

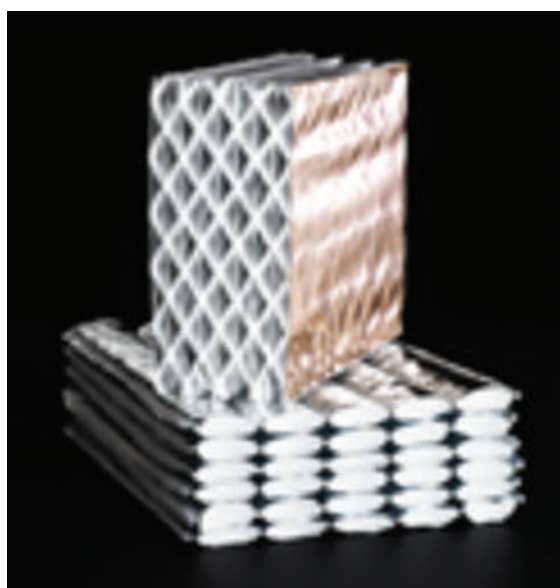


Fig. 14 | Iperisolanti termoriflettenti multistrato e alveolari Actis

richieste; ad esempio prestazioni meccanico/impattive elevate mediante scelta di lastre prestazionali oppure superfici in grado di ridurre drasticamente le emissioni di VOC e di scomporre gli agenti inquinanti indoor attraverso lastre contenenti zeoliti (derivanti da rocce vulcaniche).

I Solai e le coperture stratificate a secco

Gli orizzontamenti e le coperture di involucro possono essere anch'esse integralmente stratificate a secco (soprattutto nel caso di esigenze di leggerezza e velocità di montaggio in opera) oppure ibride.

Il pacchetto di copertura tipicamente leggero è composto da pannelli sandwich ancorati su orditure statiche secondarie; sandwich mono-lama o bi-lama in funzione del pacchetto stesso; nel caso di pannello mono-lama la finitura grecata è inferiore e al di sopra il pannello presenta un feltro predisposto per l'applicazione della prima guaina di cantiere (o barriera a vapore) e per la successiva stratificazione coibente mixata da materiali termici e capacitivi fino

allo strato impermeabile ultimo superiore e all'eventuale finitura. Nel caso invece del pannello bi-lama solitamente all'estradosso è previsto un secondo strato sandwich con ventilazione interposta. All'intradosso di entrambi i casi è localizzata la stratificazione dei vari coibenti indoor con il plenum impianti e la controsoffittatura di finitura.

Il solaio interpiano tipicamente più leggero invece è composto da orditura metallica a C con profili in acciaio presso-piegato a freddo (singola o doppia di schiena) e assito collaborante in multistrato di legno oppure da lamiera grecata strutturale accoppiata sempre a un multistrato superiore. L'estradosso è riservato ai sottofondi stratificati a secco con strato granulare desolidarizzante necessario anche per l'orizzontalità del sottofondo stesso e lastre in gessofibra di ripartizione dei carichi e di fissaggio del rivestimento previsto. Tra questi ingredienti si integrano le dotazioni impiantistiche previste all'interno del pacchetto; all'intradosso invece del solaio si presenta la controsoffittatura autoportante oppure ancorata al solaio stesso con i coibenti termo acustici e le intercapedini libere per la circolazione delle dorsali impiantistiche (figura 5).

Nel caso in cui non sia strettamente necessaria la leggerezza dell'orizzontamento, i solai di copertura o interpiano che si integrano adeguatamente con gli edifici stratificati a secco con telaio in acciaio sono realizzati con lamiera grecata e getto collaborante, su cui viene stratificato tutto il pacchetto impiantistico, previa posa di elementi resilienti acustici a garanzia delle prestazioni fonoisolanti impattive.

Come per gli involucri perimetrali, anche nei solai stratificati a secco le scelte delle finiture indoor e outdoor è molto ampia; premesso anche qui l'obiettivo di adottare opportuni materiali di finitura leggeri, le stratigrafie orizzontali e inclinate si prestano all'integrazione con qualsiasi elemento previo adeguato approfondimento progettuale.

Integrazione involucro opaco/trasparente

L'efficacia dell'interfaccia tra l'involucro opaco stratificato a secco e le porzioni trasparenti delle facciate è affidata al "sistema monoblocco", ovvero il "falso telaio integrato", che consente di garantire le prestazioni igrotermiche, acustiche e termiche del raccordo parete/serramento e allo stesso tempo di industrializzare il montaggio dell'elemento, che allo stesso tempo dovrà ospitare sia il sistema oscurante previsto che la tipologia di serramento definita nonché la finitura dei 4 lati perimetrali del vano apertura. Il sistema monoblocco pertanto diventa cruciale per il risultato qualitativo della facciata e per le prestazioni nel tempo. Inoltre consente di approvvigionare immediatamente sia i serramenti che gli oscuranti avendo la certezza dimensionale attraverso la sua progettazione esecutiva (in coordinamento con l'involucro) e la adeguata posa in opera.

Negli ultimi 12 anni sono stati realizzati sistemi monoblocchi per tutte le tipologie di serramento con montaggi in mazzetta, a filo interno o addirittura a filo esterno, garantendo la corretta tenuta all'acqua di percolamento. Sistemi monoblocchi che si adeguano a tutte le varianti dimensionali dei vani apertura e che possono ospitare tutte le tipologie di sistemi oscuranti fissi e mobili (persiane, raffstore, tapparelle, tende, etc.). Falsi telai integrati che possono ricevere varie tipologie di finitura sia sulle spalle che in

architrate purché approfonditi gli aspetti progettuali in fase di definizione del sistema; monoblocchi che si apprestano anche a ricevere già le soglie e i davanzali pre-confezionati con integrate le guaine impermeabili previste a progetto.

L'integrabilità dell'involucro a secco e gli scenari di cantiere

Le strutture S/R si caratterizzano per una grande flessibilità dovuta soprattutto alla elevata integrazione che interviene a livello progettuale; il progetto architettonico, quello strutturale e quello impiantistico vengono infatti sovrapposti e gestiti contemporaneamente, in modo tale da giungere alla fase di cantiere con elementi costruttivi estremamente ingegnerizzati (scala di dettaglio 1:5). Aspetto che attualmente viene gestito al meglio su qualsiasi piattaforma BIM (figure 11-12).

Nonostante l'elevato grado di definizione del sistema pre-cantiere, la tecnica garantisce la possibilità di modificare gli spazi interni, prevedendone gli schemi distributivi a seconda della tipologia funzionale dell'edificio, senza dover sostenere spese ingenti. Tale caratteristica è particolarmente adatta per strutture come scuole, ospedali, hotel, uffici che necessitano di spazi adattabili per rispondere velocemente al mutare delle esigenze di destinazione d'uso.

Nel corso degli anni inoltre è possibile adeguare la struttura alle esigenze nel frattempo intercorse, come ad esempio un'evoluzione impiantistica, effettuando operazioni semplici e poco costose di adeguamento, dove la velocità degli interventi consente di ridurre eventuali sospensioni delle attività a cui l'edificio è destinato.

Tutto questo è facilmente gestibile mediante la progettazione su piattaforma BIM - Building Information Modelling - che permette di generare modelli multi-dimensionali virtuali al fine di ottimizzare l'integrazione delle singole discipline progettuali in tutte le fasi di progetto, di realizzazione in opera e lungo il suo intero ciclo di vita (gestione e manutenzione dell'edificio fino alla eventuale dismissione).

Case study: esempio di stratigrafia d'involucro perimetrale

Palazzina plurifamiliare di 7 unità abitative a Torre Boldone (BG) Classe A+ CENED Lombardia - Classe A CasaClima - anno di realizzazione 2010/11 - Progetto Studio ATelier 2 Imperadori & Gallotti Associati, Milano

Stratigrafia (dall'interno vs esterno) parete nord

- lastra in gesso rivestito (12,5 mm)
- barriera vapore (0,2 mm)
- lastra in gesso rivestito (12,5 mm)
- orditura metallica in acciaio zincato (100 mm) con interposti:
 - intercapedine (20 mm)
 - strato isolante fibroso (80 mm)
 - intercapedine (10 mm)
 - strato isolante fibroso (80 mm x 2)
 - strato isolante in lana di legno mineralizzata (30 mm)
- orditura metallica Mgz (75 mm) con interposti:
 - strato isolante fibroso (60 mm)

- intercapedine (15 mm)
- strato di tenuta all'acqua/permeabile a vapore (0,5 mm)
- lastra in fibrocemento (12,5 mm)
- strato isolante (40 mm) applicato a colla
- rasatura esterna (5 mm)

Nelle figure 15-23 sono riportate alcune immagini del cantiere del Case Study.

Caratteristiche e Prestazioni

Spessore parete: 45 cm

Peso pacchetto: 78 kg/m²

Trasmittanza termica U: 0,10 W/m²K

Sfasamento termico: 12 h

Potere fonoisolante Rw > 60 dB



Fig. 15 | Foto palazzina realizzata - Torre Boldone (BG) 2010/11



Fig. 16 | Foto sistema d'involucro fronte sud



Fig. 17 | Fasi di assemblaggio delle carpenterie in acciaio e della pelle esterna in lastre fibro-cementizie

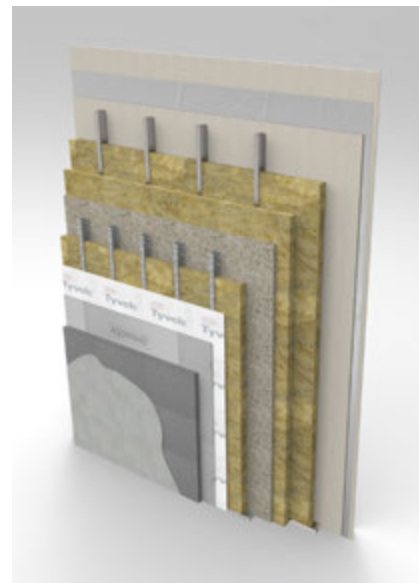
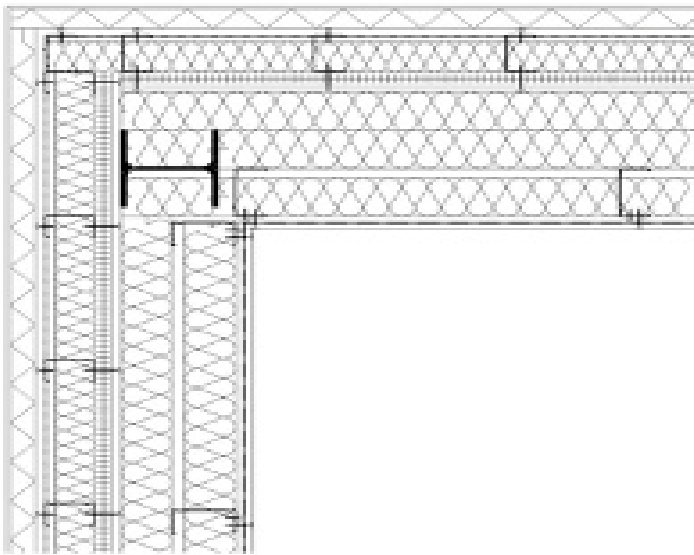


Fig. 18 | Pacchetto d'involucro - Dettaglio Nodo costruttivo dell'involucro d'angolo in sezione orizzontale (raccordo parete nord/parete ovest)



Fig. 19 | Gestione dei ponti termici strutturali mediante fasciatura con iperisolante termoriflettente Actis



Fig. 20 | Fase di assemblaggio del manto di copertura degli impianti e dei sistemi oscuranti

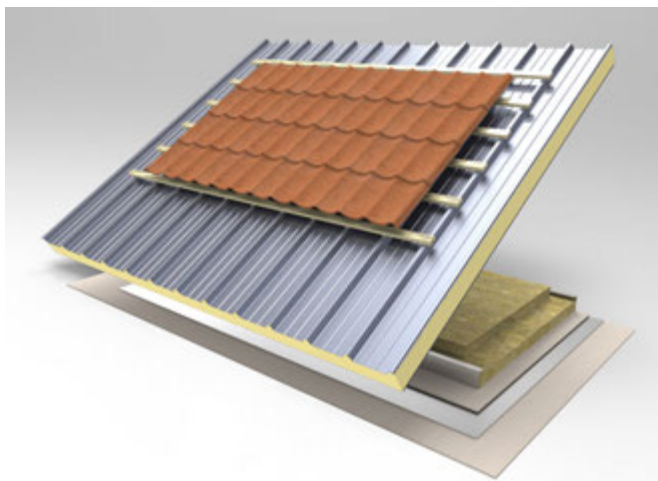


Fig. 21 | Pacchetto d'involucro di copertura

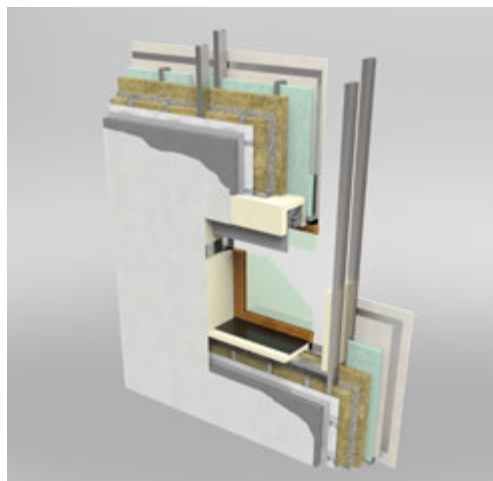


Fig. 22 | Sistema di interfaccia tra involucro e serramenti. Immagine e Foto sistema monoblocco in opera



Fig. 23 | Certificazioni energetiche CENED Lombardia e Casaclima edificio S/R



Mirko Berizzi

Ingegnere Edile/Architetto laureato al Politecnico di Milano, Direttore Tecnico della Vanoncini Spa, l'Ing. Mirko Berizzi coordina da una quindicina d'anni l'Ufficio Tecnico dell'Azienda specializzata nella progettazione e nella costruzione stratificata a secco S/R [Struttura/Rivestimento]. Esperto nella Progettazione fisico tecnica di tutti i sistemi costruttivi mediante lo studio integrato, si occupa anche di diagnosi energetica e monitoraggio (termografia, blower door test, termoflussimetria, prove di carico), consulenza energetica, ricerca e sviluppo, supervisione tecnica dei cantieri e formazione quale redattore e relatore di Vanoncini Academy, realtà che organizza e propone convegni, corsi e seminari tecnici per progettisti e installatori relativi al sistema costruttivo a secco e a tutte le discipline di fisica tecnica collegata: igrotermia, acustica, protezione passiva al fuoco e termica (i format più consolidati e diffusi sono #Costruireasecco, #Progettareasecco, #LABdellesoluzioni)



L' Azienda Vanoncini SpA

La sede di Vanoncini SpA – Mapello (BG)

L'azienda Vanoncini, moderna impresa edile specializzata nella Tecnica costruttiva dei sistemi a secco, ha sede principale a Mapello (BG) e filiali a Rho (MI), Pantigliate (MI) e Carate Brianza (MB).

Architettura, ingegneria, impiantistica, protezione passiva al fuoco e fisica tecnica si integrano nella progettazione per realizzare edifici/sopralzi/ampliamenti a bassissimo consumo energetico sia di nuova costruzione che riqualificati.

Il Reparto tecnico dell'Azienda offre un servizio di ingegnerizzazione del Sistema a secco definendo i dettagli costruttivi integrati partendo dai singoli progetti definitivi; inoltre dispone di strumentazioni per la diagnosi energetica pre-intervento e il monitoraggio post-intervento (termografia, blower door, termoflussimetria).

Il settore Ricerca e Sviluppo collabora continuamente con Università, enti, associazioni di professionisti e industrie per ricercare nuovi materiali da testare ed applicare sul campo.

Il ramo commerciale dell'azienda propone tutti gli elementi del Sistema (testati e provati in cantiere) fornendo assistenza e know-how sulla tecnologia a secco

L'Azienda attraverso Vanoncini Academy organizza e promuove, in collaborazione con gli Ordini professionali, percorsi formativi sul Sistema a secco per progettisti e imprese. Tutte le iniziative e le attività in corso sono divulgate dal reparto marketing attraverso il sito web (www.vanoncini.it) e i canali social.

ANALISI SPERIMENTALE ALLE ALTE TEMPERATURE DEL COMPORTAMENTO DI ELEMENTI STRUTTURALI IN ACCIAIO ZINCATO

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE BEHAVIOUR OF GALVANIZED STEEL ELEMENTS AT ELEVATED TEMPERATURE

Margherita Autiero, Donatella de Silva, Antonio Bilotta, Emidio Nigro*

Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura (Di.St.), Università degli Studi di Napoli Federico II. Via Claudio n. 21, 80125, Napoli (Italia)

Recenti studi sperimentali hanno mostrato che la zincatura a caldo, già efficace per proteggere gli elementi strutturali in acciaio dalla corrosione, è anche in grado di ridurre il campo termico negli elementi in acciaio esposti all'incendio grazie alla riduzione dell'emissività superficiale. Attualmente la parte fuoco dell'Eurocodice 3 fornisce un valore di emissività costante pari a 0,70, mentre i documenti di riferimento per la prossima generazione degli Eurocodici strutturali suggeriscono di considerare questo effetto benefico attraverso un valore di emissività dipendente dalla temperatura. In tale ambito il presente articolo illustra i risultati di una campagna di prove sperimentali alle alte temperature, finalizzate a studiare l'effetto della zincatura sulla temperatura di piastre in acciaio in piccola scala al variare del loro fattore di sezione (A_m/V). Le prove sono state eseguite in un forno elettrico da laboratorio esponendo al riscaldamento solo la faccia superiore dei campioni ed utilizzando materiali protettivi che riducono lo scambio di calore sulle restanti facce; in questo modo è stato possibile ottenere diversi fattori di sezione semplicemente variando lo spessore delle piastre. Per fattore di sezione, compresi tra 20 e 200 m^{-1} , sono stati testati provini di acciaio zincato e non zincato in modo da confrontare direttamente le temperature raggiunte nell'acciaio per effetto delle stesse curve di riscaldamento. I risultati hanno mostrato che il riscaldamento nei campioni zincati è più lento di quello registrato negli elementi non zincati, confermando l'effetto benefico della zincatura. Al fine di tener conto di questo effetto benefico della zincatura, mediante la riduzione dell'emissività superficiale, è stato applicato in maniera inversa il metodo analitico per il calcolo della temperatura di elementi in acciaio, suggerito anche dall'Eurocodice per le analisi termiche semplificate. Pertanto, utilizzando le temperature registrate durante le prove è stato possibile ricavare leggi di emissività superficiale in funzione della temperatura dell'elemento. Infine, per quantificare l'effetto benefico della zincatura sulle prestazioni strutturali in condizioni di incendio, sono state condotte diverse applicazioni della legge di emissività dipendente dalla temperatura, al variare della curva di incendio, considerando anche curve di incendio naturali.

Recent studies showed that hot dip galvanizing, which is already effective in protecting steel elements from corrosion, is also able to provide a beneficial effect in fire conditions thanks to a reduction in surface emissivity. Therefore, background documents for the next generation of structural Eurocodes suggest considering this positive effect through a temperature dependant surface emissivity relationship. This paper shows the results of high-temperature small-scale tests, aimed at investigating the effect of galvanization on the temperature of steel plates with variable section factors. The experimental tests were carried out in an electrical furnace by exposing to heat only the upper face of the prismatic samples and by inhibiting the heat exchange on the remaining faces thanks to protective materials, in order to obtain an equivalent section factor (A_m/V) by simply varying the thickness of the plates. For each section factor, ranging between 20 and 200 m^{-1} , both galvanized and blank steel specimens were tested to directly compare the temperatures during the same heating histories. The test results show that the heating in hot-dip galvanized samples was slower than the one recorded in blank samples, confirming the beneficial effect of the galvanization. To consider this beneficial effect by means of emissivity, the analytical method for calculating the temperature of steel elements, also suggested by Eurocode for simplified thermal analysis, was applied inversely. Using the temperatures recorded during the tests, it was possible to obtain surface emissivity laws according to the temperature of the element. Finally, in order to quantify the galvanization beneficial effect on structural performance under fire conditions, several applications of the temperature-dependent emissivity law were conducted, by varying the fire curve, including natural fire curves.

*Corresponding author. Email: eminigro@unina.it

1. INTRODUZIONE

La zincatura è un processo di rivestimento superficiale il cui scopo è la protezione dell'acciaio dalla corrosione utilizzando le proprietà dello zinco. Nel caso della zincatura a caldo, il rivestimento protettivo di zinco è ottenuto immergendo l'elemento di acciaio in un bagno di zinco fuso a circa 450°C. Il rivestimento che si ottiene al termine di questo processo, non è semplicemente deposito, ma è come saldato alla superficie degli elementi in acciaio. Infatti durante l'immersione dell'elemento in acciaio nel bagno, lo zinco si lega all'acciaio per mezzo di una reazione metallurgica, comportando la formazione di diversi strati di leghe Fe-Zn. Il meccanismo di formazione del rivestimento di zinco è influenzato da diversi fattori. Vale a dire, da un lato dalle condizioni di zincatura ovvero dalla temperatura e dalla composizione del bagno di zinco, così come dal tempo di contatto tra l'elemento da zincare con lo zinco fuso.

Dall'altro lato dalla composizione chimica dell'acciaio stesso, infatti la presenza nell'acciaio da zincare di elementi quali ad esempio, silicio e fosforo, è determinante per la formazione e la velocità di crescita dello strato di zincatura durante l'immersione. È stato osservato, infatti, come la presenza di silicio in quantità comprese tra lo 0,04 e lo 0,12% (Intervallo di Sandelin) o superiori allo 0,22% (acciai iper-Sandelin) è in grado di accelerare la reazione ferro-zinco, formando un rivestimento che ha uno spessore visibilmente maggiore [1].

In accordo alla norma UNI EN ISO 14713-2 [2] vengono definite quattro categorie di acciaio (C_x) sulla base della concentrazione di Silicio (Si): C_A - acciaio a basso contenuto di silicio ($Si \leq 0,04\%$), C_B: acciai di composizione intermedia non Sandelin ($0,14\% < Si \leq 0,22\%$), C_C: intervallo di Sandelin ($0,04\% < Si \leq 0,14\%$) and C_D: acciaio iper-Sandelin ($Si > 0,22\%$).

Il rivestimento superficiale che si forma è in grado di modificare l'emissività dell'elemento in acciaio (ϵ), definita come il rapporto tra l'energia irradiata dalla superficie di un materiale e l'energia irradiata da un corpo nero, nelle stesse condizioni, alla stessa temperatura e lunghezza d'onda. L'emissività presenta un valore compreso tra zero ed uno, per cui minore è l'emissività di una superficie, più lentamente si sviluppa il riscaldamento. La componente radiante del flusso di calore è dipendente dal valore dell'emissività della fiamma, ϵ_f , e dall'emissività della superficie, ϵ_m [3].

La radiazione delle superfici metalliche dipende dal livello atomico e molecolare. In particolare, Sala [4] afferma che la radiazione delle superfici metalliche dipende dalla composizione chimica in uno strato con uno spessore di qualche micrometro. Per cui il comportamento radiativo delle superfici zincate dovrebbe quindi essere fornito esclusivamente dallo strato di lega (da 40 a 250 μm) o dal solo strato superiore di zinco puro, che ha uno spessore di pochi micrometri [5].

L'emissività dei componenti in acciaio zincato a caldo è influenzata dal carattere della formazione dello strato, dall'ossidazione dello zinco e, poiché il punto di fusione dello zinco è a soli 419 °C, dalla fusione dello strato di zinco esterno. Pertanto l'emissività della superficie zincata è variabile a seconda della temperatura [5].

L'Eurocodice EN1993-1-2 [3] fornisce, per l'acciaio strutturale, un valore di emissività costante ed indipendente dalla superficie $\epsilon_m =$

0,70, mentre studi recenti [5],[6],[7],[8],[9],[10],[11] hanno mostrato come la zincatura a caldo, sia in grado di fornire un effetto benefico sulla temperatura dei componenti in acciaio esposti all'incendio grazie ad una riduzione dell'emissività superficiale.

Jirku e Wald (2013) [6] hanno eseguito due prove in forno orizzontale e una prova in scala reale su sezioni in acciaio aperte IPE 200 e sezioni circolari cave, ottenendo un valore di emissività superficiale per l'acciaio zincato costante pari a 0,32. Bihina et al. [7] hanno condotto tre set di prove sperimentali su elementi in acciaio laminati a caldo.

I campioni erano costituiti da colonne esposte all'incendio su quattro lati e travi esposte su tre lati. Utilizzando le temperature misurate durante le prove, è stata determinata l'emissività equivalente dei campioni, trovando che per i campioni zincati a caldo, l'emissività generalmente aumenta con la temperatura. Gaigl (2019) [5], mediante una prova in piccola scala e due prove in scala reale, ha valutato un andamento dell'emissività in funzione della temperatura, per elementi di acciaio zincati a caldo.

Quest'ultimo è stato determinato per diverse superfici zincate a caldo, testando le diverse categorie di acciaio C_A, C_B, e C_D combinate con tutte le possibili condizioni superficiali. I risultati sperimentali hanno evidenziato come l'emissività sia dipendente non solo dalla temperatura, ma anche dalle condizioni di invecchiamento dei provini con un'influenza negativa della conservazione all'esterno. Inoltre, i risultati hanno evidenziato come gli strati di lega zinco-ferro delle superfici zincate abbiano una grande influenza sul valore dell'emissività.

In particolare, solo per gli acciai C_A e C_B, sono stati osservati valori di emissività minori di 0,7 per temperature dell'acciaio inferiori ai 530°C, corrispondente al livello di resistenza dello strato di lega Zinco-Ferro interno. Con l'aumento della temperatura, a causa di reazioni chimiche si forma una nuova struttura dello spessore di rivestimento, con una rugosità maggiore a cui si accompagna un valore di emissività crescente.

Pertanto, mentre l'EN1993-1-2 [3] si riferisce ad un valore di emissività per l'acciaio strutturale costante ed indipendente dalla superficie, $\epsilon_m = 0,70$, i risultati delle sperimentazioni condotte, mostrano per elementi in acciaio zincato a caldo un'emissività variabile con la temperatura, con valori minori di 0,7 per temperature inferiori a 530°C.

Poiché gli studi condotti in letteratura hanno mostrato un effetto benefico della zincatura sulla temperatura dell'acciaio grazie alla variazione dell'emissività superficiale, Mensinger e Gaigl [5] hanno proposto una modellazione del fenomeno basata su un approccio semplificato a due fasi con un'emissività $\epsilon_m = 0,35$ per la temperatura dell'acciaio, $\theta_{a,t}$, inferiore a 500 °C e $\epsilon_m = 0,70$ per $\theta_{a,t}$ superiore a 500 °C.

Partendo da queste considerazioni, il presente articolo illustra i risultati di una campagna di prove sperimentali in piccola scala alle alte temperature condotte su piastre quadrate in acciaio zincato e non zincato. L'obiettivo era quello di andare a studiare e quantificare l'effetto della zincatura sulle temperature degli elementi in acciaio, al fine di calcolare l'emissività dell'acciaio zincato attraverso prove su piccola scala in un comune ed economico forno elettrico. Nell'ultima parte di questo lavoro, l'effetto della zincatura è stato analizzato facendo variare la curva di incendio e i fattori

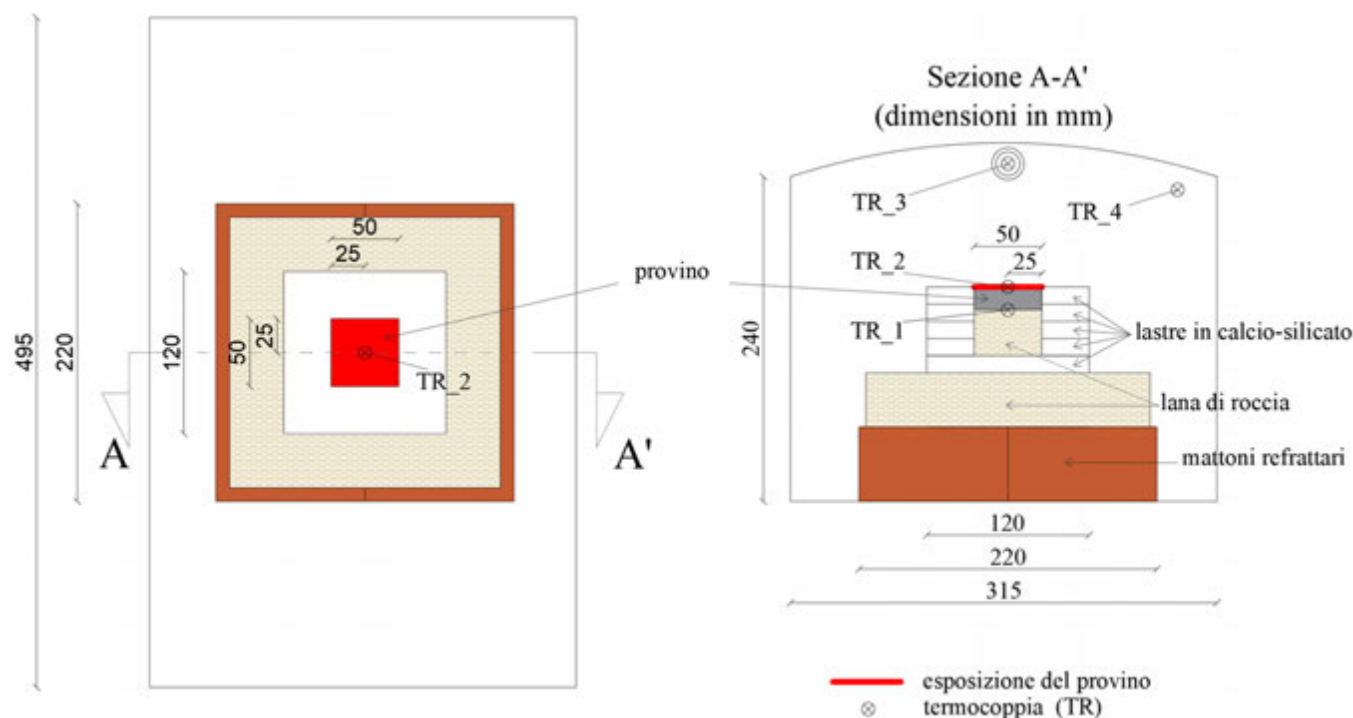


Fig. 1 | Setup di prova: (a) vista dall'alto, (b) sezione A-A

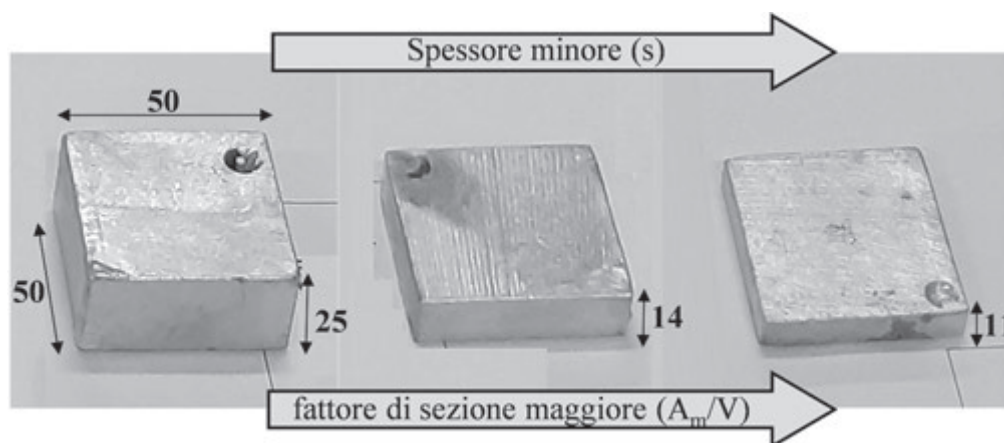


Fig. 2 | Campioni sperimentali 50x50 mm con differenti spessori (s)

di sezione degli elementi A_m/V , evidenziando in quali condizioni considerare l'effetto benefico della zincatura potrebbe portare ad un miglioramento delle prestazioni di resistenza al fuoco.

2. TEST SPERIMENTALI

Le prove sono state effettuate utilizzando un forno elettrico da laboratorio, esponendo al riscaldamento solo la faccia superiore dei provini in acciaio e utilizzando materiali protettivi che riducono lo scambio di calore sulle restanti facce.

2.1 Campioni e setup di prova

Le piastre testate sono state in totale 44 e ciascuna di esse è stata posta all'interno di un box costituito da cinque lastre in calcio-silicato di spessore 12,7 mm, per ottenere una condizione approssimativamente adiabatica sia lateralmente che inferiormente

(figura 1a). Il box è stato poggiato su uno strato di lana di roccia e, infine, su mattoni refrattari. Per allineare la faccia superiore della piastra e del box si è usato un riempimento di lana di roccia a spessore variabile in funzione dello spessore della piastra (figura 1b). Sono state utilizzate piastre di forma quadrata di dimensioni in pianta 50x50 mm, con spessori variabili al fine di ottenere un range di fattori di sezione A_m/V (rapporto tra la superficie esposta al fuoco e il volume dell'elemento) compreso tra 20 a 200 m^{-1} . Per ogni fattore di sezione sono stati testati tre provini zincati (G) e uno non zincato (NG), così da poter confrontare direttamente le loro temperature. La figura 2 mostra le dimensioni dei provini con differenti spessori, prima di essere sottoposti a prova.

I campioni sono stati zincati utilizzando il bagno di zincatura riportato nella tabella 1, secondo la norma UNI EN 1461:2009, ottenendo per i provini galvanizzati uno spessore medio di

zincatura di circa 120 μm .

Tab. 1 | Composizione del bagno di zinco

	Concentrazione % P/P	Valori ottimali
Piombo - Pb	0,570	0,6 – 1,1 %
Stagno - Sn	0,082	$\leq 0,10$ %
Alluminio - Al	0,002	0,001 – 0,005 %
Rame - Cu	0,019	0,0 – 0,03 %
Ferro - Fe	0,027	0,018 – 0,02 %

L'ID di ciascun provino è indicato come X-Y-Z: dove X rappresenta il fattore di sezione del provino, Y indica se il provino è zincato ovvero galvanizzato (G) o non zincato ovvero non galvanizzato (NG) e Z indica il numero del provino. Gli spessori dei provini, i loro fattori di sezione e il rispettivo ID, vengono elencati nella tabella 2.

2.2 Strumentazione sperimentale e curva di input termico

Dal foro di ispezione presente sul fondo del forno sono state inserite tre termocoppie Chromel/Alumel d tipo K, che si aggiungono a quella propria del forno (figura 3a). In particolare, la termocoppia (TR_1) è stata utilizzata per misurare la temperatura del provino di acciaio nella faccia direttamente esposta, mentre la (TR_2) misurava la temperatura nella faccia non esposta. Per inserire queste due termocoppie ogni campione è stato precedentemente forato con un diametro del foro di 2,5 mm e una profondità di 4 mm. La termocoppia (TR_3) è stata utilizzata per il controllo della temperatura del forno, così come la termocoppia del forno (TR_4); lo schema di questi dispositivi è illustrato nella figura 3a. Un sistema di acquisizione ha permesso la registrazione di tutte le temperature rilevate da ciascuna termocoppia. Poiché questa tipologia di forno elettrico non consente di ottenere un andamento della temperatura pari alla curva di incendio standard (ISO834), è stata utilizzata una curva di input termico diversa, ottenuta impostando un programma termico con uno sviluppo della temperatura variabile da 20 a 800 °C, più lenta della curva di incendio standard. La figura 3b mostra i valori di queste temperature, registrati dalla TR_3, per i tre fattori di sezione selezionati, dove è possibile osservare come queste curve risultino confrontabili e pertanto, avere una curva di input stabile, ha permesso di effettuare confronti diretti tra i risultati sperimentali.

3. RISULTATI SPERIMENTALI

Per ragioni di brevità, di seguito vengono commentati in dettaglio i risultati sperimentali ottenuti per tre fattori di sezione ($A_m/V = 40, 80, 200 \text{ m}^{-1}$) rappresentativi della campagna di prove realizzata. La figura 4 mostra, per ciascuno dei tre fattori di sezione selezionati, le temperature registrate dalla TR_1 per ciascun campione zincato ed il loro valore medio (curva nera). Inoltre, nei grafici della figura 4 viene riportata la curva di input termico, ottenuta come la media di ogni prova con lo stesso A_m/V (Mean_input_ A_m/V). Per i fattori di sezione $A_m/V = 40$ e 80 m^{-1} vengono mostrati i risultati ottenuti

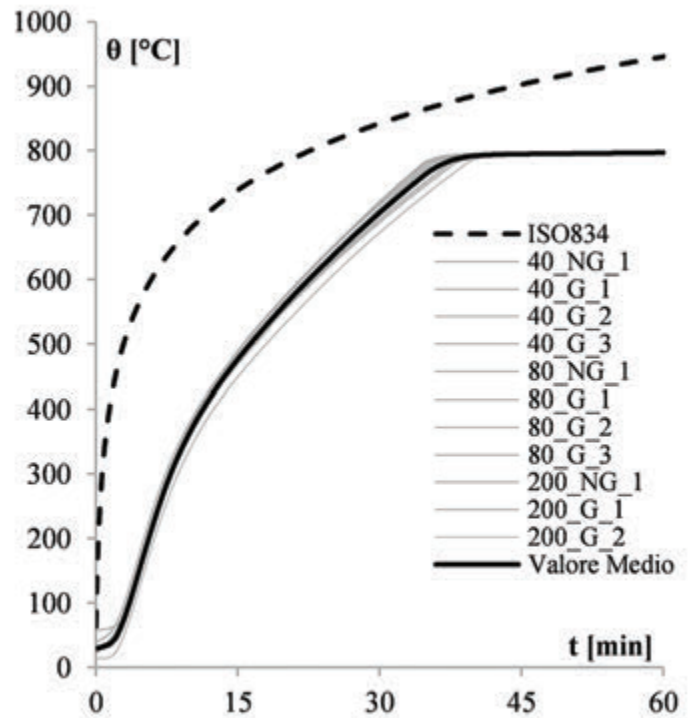
per i tre provini zincati (G) e per il provino non zincato (NG). Mentre, per il fattore di sezione pari a 200 m^{-1} erano disponibili solo i risultati ottenuti per due dei provini zincati e per quello non zincato, a causa di una termocoppia non funzionante durante la prova.

Tab. 2 | Matrice delle prove

Campione n°	ID	A_m/V [m^{-1}]	s [mm]
1	20_NG_1	20	50
2	20_G_1		
3	20_G_2		
4	20_G_3	30	35
5	30_NG_1		
6	30_G_1		
7	30_G_2	40	25
8	30_G_3		
9	40_NG_1		
10	40_G_1	50	20
11	40_G_2		
12	40_G_3		
13	50_NG_1	60	17
14	50_G_1		
15	50_G_2		
16	50_G_3	70	14
17	60_NG_1		
18	60_G_1		
19	60_G_2	80	12,5
20	60_G_3		
21	70_NG_1		
22	70_G_1	90	11
23	70_G_2		
24	70_G_3		
25	80_NG_1	100	10
26	80_G_1		
27	80_G_2		
28	80_G_3	125	8
29	90_NG_1		
30	90_G_1		
31	90_G_2	125	8
32	90_G_3		
33	100_NG_1		
34	100_G_1	125	8
35	100_G_2		
36	100_G_3		
37	125_NG_1	125	8
38	125_G_1		
39	125_G_2		
40	125_G_3		



a)



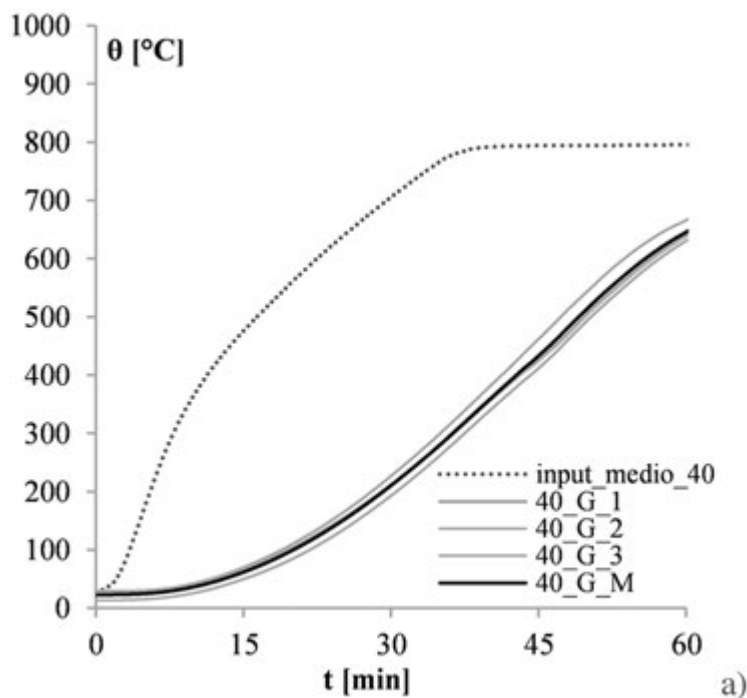
b)

Fig. 3 | Setup di prova nel forno con le termocoppie posizionate (a), curve di input termico: temperature registrate dalla TR_3 (b).

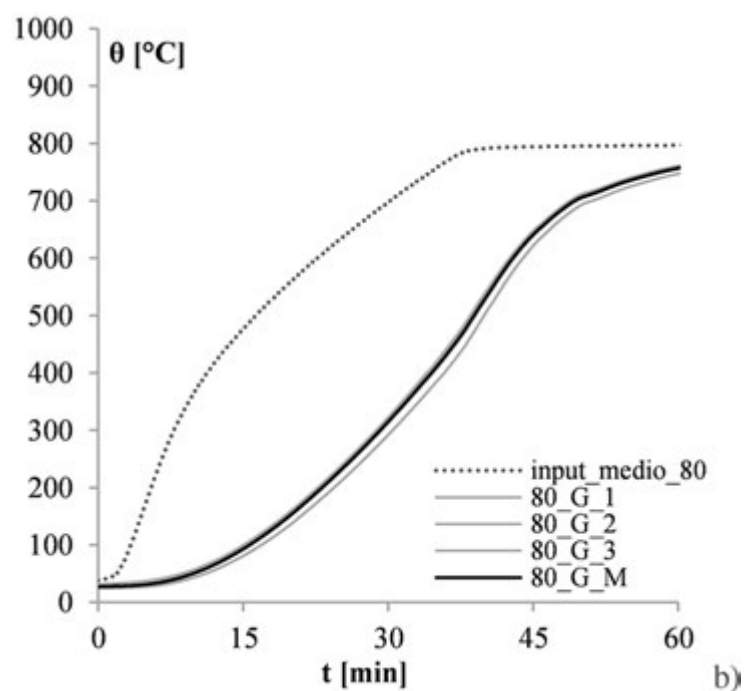
Da questi confronti è possibile osservare come in tutti i casi le temperature registrate nei provini zincati, durante ogni prova, risultino molto simili tra loro, dimostrando non solo la stabilità dei risultati sperimentali, ma anche l'affidabilità del setup di prova. Pertanto, ciò permette di considerare una buona ripetitività delle prove e di effettuare, successivamente, un confronto diretto tra provini non zincati e zincati, considerando un andamento di temperatura medio per ciascun fattore di sezione; indicato come

A_m/V_G_M , nel caso dei campioni zincati ed A_m/V_NG_M nel caso dei campioni non zincati.

La figura 5a mostra i risultati sperimentali ottenuti per i provini non zincati (40_NG) e zincati (40_G_M) rispettivamente con curve tratteggiate e continue. Questi risultati sperimentali mostrano chiaramente l'effetto della zincatura sul rallentamento del riscaldamento; pertanto, i provini zincati a caldo presentano temperature inferiori rispetto al provino non zincato. Ad esempio, a 30 minuti di esposizione, la temperatura del provino non zincato



a)



b)

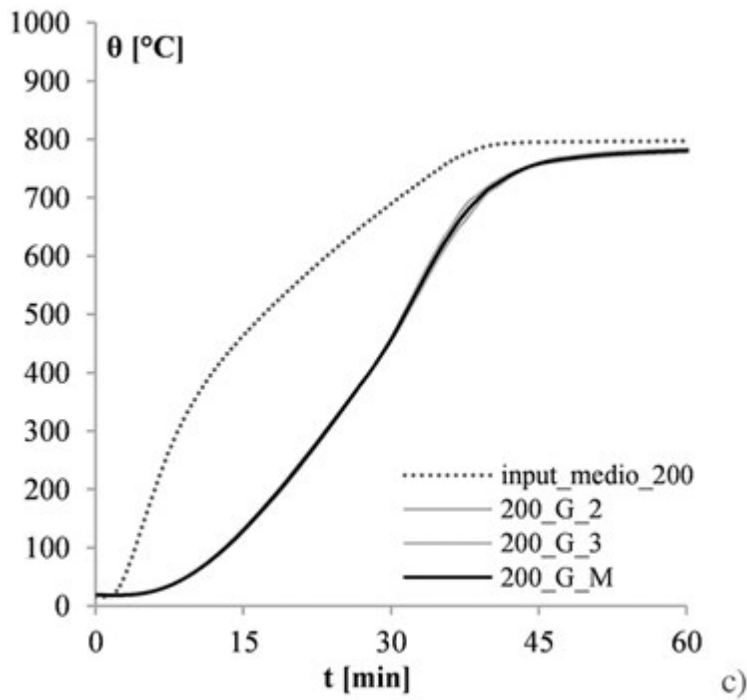


Fig. 4 | Confronto delle temperature dei tre provini zincato con uguale A_m/V e il loro valore medio (G_M); $A_m/V= 40 \text{ m}^{-1}$ (a), $A_m/V= 80 \text{ m}^{-1}$ (b), and $A_m/V= 200 \text{ m}^{-1}$ (c)

θ_{40_NG} raggiunge i $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ mentre lo stesso provino zincato presenta una temperatura θ_{40_G} di $211 \text{ }^{\circ}\text{C}$. questa differenza di circa 40°C cambia durante il riscaldamento con un valore massimo $\Delta\theta_{\text{max}} = 111^{\circ}\text{C}$ ottenuta a 47 minuti, quando le temperature sono di $572 \text{ }^{\circ}\text{C}$ per il campione non zincato e di $462 \text{ }^{\circ}\text{C}$ per il campione zincato. Nella figura 5b vengono rappresentati i risultati sperimentali ottenuti per i campioni non zincati (80_NG) e zincati (80_G_M). La prima cosa che si osserva, rispetto al caso precedente (figura 5a), è un riscaldamento più veloce, dovuto ad uno spessore minore dei campioni e quindi un maggiore fattore di sezione ($A_m/V= 80 \text{ m}^{-1}$), ottenendo quindi temperature maggiori sia per i campioni zincati che per i campioni non zincati.

Ciò nonostante, l'effetto della zincatura sul rallentamento del riscaldamento è ancora apprezzabile, infatti i provini zincati mostrano temperature inferiori rispetto ai corrispondenti provini non zincati. Per esempio, a 30 minuti di esposizione nel provino non zincato la temperatura θ_{80_NG} è pari a $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ mentre negli stessi provini non zincati la temperatura θ_{80_G} è pari a $315 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Questa differenza di 86°C cambia durante il riscaldamento con un valore massimo di $169 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a 37 minuti, quando le temperature sono rispettivamente $\theta_{80_NG} = 625 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\theta_{80_G} = 456 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Passando ad un fattore di sezione di 200 m^{-1} , i provini mostrano un riscaldamento più veloce (figura 5a,c), ed il massimo effetto della zincatura sulla temperatura si osserva appena a 28 minuti, a questo tempo infatti si ha un $\Delta\theta_{\text{max}}$ uguale a $162 \text{ }^{\circ}\text{C}$ con θ_{200_NG} di $614 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e θ_{200_G} di $457 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Con l'aumento del tempo di esposizione, l'effetto benefico della zincatura si riduce a causa del rapido riscaldamento degli elementi, dettato da un valore elevato del fattore di sezione A_m/V .

Nella figura 6 viene mostrato il confronto diretto tra i risultati sperimentali dei provini zincati e non zincati, ottenuti per i tre

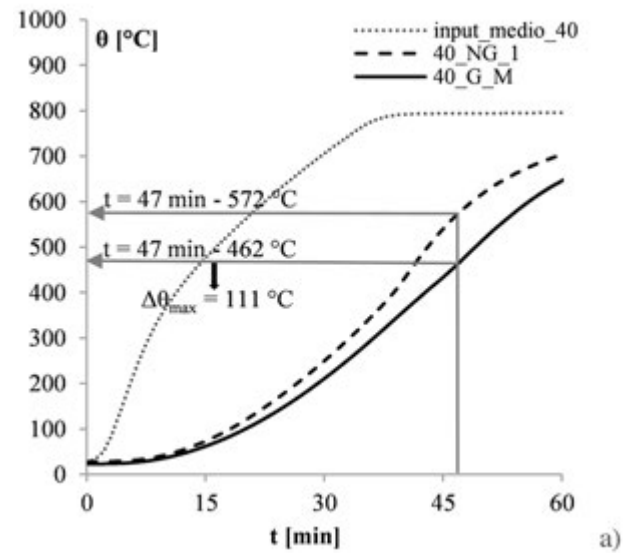


Fig. 5 | Confronto tra le temperature registrate per i campioni non zincati (NG_1) e il valore medio di quelli zincati (G_M) con lo stesso A_m/V : (a) 40 m^{-1} , (b) 80 m^{-1} , e (c) 200 m^{-1}

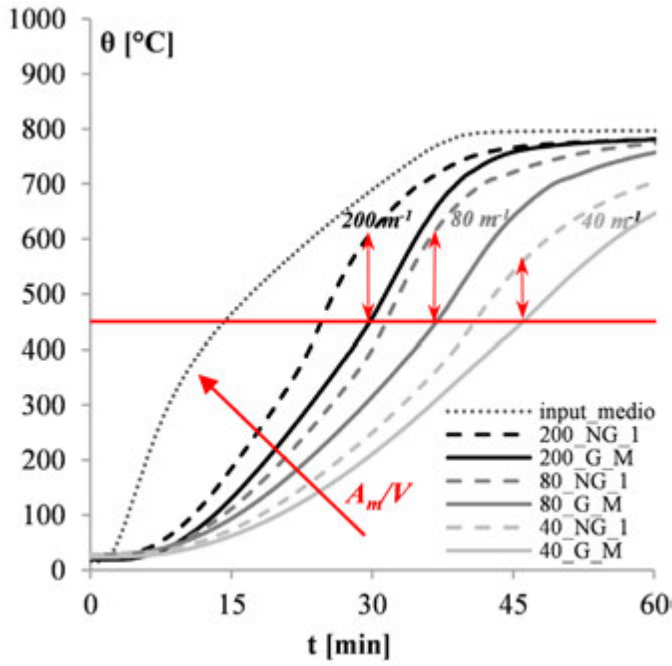


Fig. 6 | Confronto tra i risultati sperimentali dei diversi campioni zincati (G) e non zincati (NG) con $A_m/V = 40, 80, 200 \text{ m}^{-1}$

fattori di sezione analizzati $A_m/V = 40, 80$ e 200 m^{-1} . A causa dei diversi valori di A_m/V , gli andamenti delle temperature sono chiaramente differenti, ma per il medesimo A_m/V , la differenza di temperatura massima tra i campioni zincati e non zincati viene raggiunta quando la temperatura nei campioni zincati è pari a circa 450 °C . Chiaramente tale temperatura viene raggiunta a diversi istanti di tempo.

4. MODELLAZIONE ANALITICA DEI CAMPIONI ZINCATI A CALDO

Partendo dai risultati sperimentali, è stata effettuata una simulazione delle prove sui campioni zincati, applicando il metodo analitico per il calcolo del campo termico all'interno degli elementi in acciaio, suggerito anche dall'Eurocodice EN1993-1-2 [3], secondo il quale, assunta uniforme la distribuzione di temperatura nella sezione trasversale, l'aumento della temperatura in un elemento di acciaio non protetto durante un intervallo di tempo Δt può essere determinato dalla seguente equazione [3]:

$$\Delta\theta_{a,t} = K_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t \quad (1)$$

Sulle superfici esposte, il flusso di calore netto \dot{h}_{net} è determinato considerando il trasferimento di calore per convezione $\dot{h}_{net,c}$ e radiazione $\dot{h}_{net,r}$ come [12]:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (2)$$

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad (3)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (4)$$

dove:

α_c = il coefficiente di scambio termico per convezione [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$];
 θ_g = la temperatura del gas in prossimità dell'elemento esposto al fuoco [$^{\circ}\text{C}$];
 θ_m = la temperatura superficiale dell'elemento strutturale [$^{\circ}\text{C}$];
 Φ = il fattore di configurazione;
 ε_m = l'emissività superficiale dell'elemento strutturale;
 ε_f = l'emissività della fiamma;
 σ = la costante di Stephan Boltzmann ($= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$);
 θ_r = è la temperatura radiante dell'ambiente che può essere rappresentata da quella dei gas θ_g ivi contenuti [$^{\circ}\text{C}$].

L'effetto della zincatura è stato modellato secondo l'approccio semplificato a due fasi suggerito in [5] ($\varepsilon_m = 0,35$ per $\theta_{a,t} \leq 500 \text{ °C}$; $\varepsilon_m = 0,70$ per $\theta_{a,t} > 500 \text{ °C}$), che sarà successivamente chiamato NEW_EN_G. Nell'equazione (3) θ_g è stata assunta uguale alla curva di input ottenuta da ciascuna prova. È stato inoltre utilizzato, un coefficiente di convezione, α_c , inferiore a quello relativo alla curva di incendio standard, così da considerare il flusso termico convettivo specifico per queste prove. Questo valore di α_c è stato calcolato per i provini non zincati con tre diversi fattori di sezione, prendendo in esame una media delle temperature registrate dalle termocoppie TC_1 inferiore e TC_2 superiore e considerando il provino come un corpo grigio e l'area delle pareti del forno, più grandi rispetto alla superficie del singolo provino, in questo modo, è stato calcolato un valore medio di α_c pari a $6,4 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.

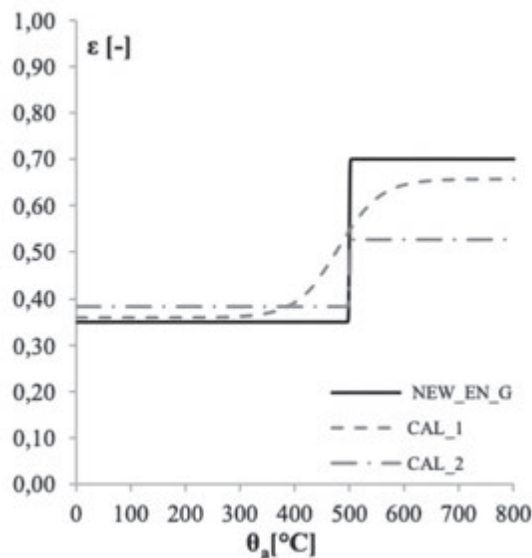
Inoltre, al fine di ottenere una legge di variazione dell'emissività con le temperature dell'acciaio, è stata calibrata la seguente funzione analitica, andando a confrontare i risultati sperimentali ottenuti per i campioni zincati con quelli analitici e facendo variare i parametri: $\varepsilon_{m,max}$, $\varepsilon_{m,min}$, β e γ .

$$\varepsilon_m = 0.5 \cdot (\varepsilon_{m,max} - \varepsilon_{m,min}) \cdot \tanh\left[\left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot (\theta_{a,t} - \gamma)\right] + 0.5 \cdot (\varepsilon_{m,max} + \varepsilon_{m,min}) \quad (5)$$

In particolare, sono state condotte due diverse calibrazioni: CAL_1, per ciascun A_m/V , e CAL_2, per tutti gli A_m/V . Figura 7 mostra l'andamento delle due curve ottenute dall'equazione (5) per CAL_1 e CAL_2 confrontate con l'approccio semplificato a due fasi (NEW_EN_G).

Le due curve, sebbene ottenute partendo da risultati di prove in piccola scala eseguite in un comune forno elettrico da laboratorio, permettono di confermare che l'andamento dell'emissività dell'acciaio zincato a caldo dipende dalla temperatura.

Nella figura 8 viene riportato il confronto tra le temperature sperimentali e analitiche calcolate utilizzando i valori di emissività delle CAL_1, CAL_2 e NEW_EN_G dal quale è possibile osservare per il $A_m/V = 80 \text{ m}^{-1}$ un'ottima corrispondenza con le curve sperimentali, mentre una piccola differenza si può osservare nel caso di $A_m/V = 40 \text{ m}^{-1}$ and $A_m/V = 200 \text{ m}^{-1}$. Inoltre, la figura 8 mostra che le curve calcolate analiticamente, utilizzando valori di emissività secondo CAL_1, CAL_2 e NEW_EN_G sono molto simili tra di loro. Pertanto, considerando che le CAL_1, CAL_2 sono state calibrate utilizzando una curva di input più lenta della curva di incendio standard ISO 834, possono essere utilizzate anche per curve di incendio naturali che spesso hanno gradienti minori della curva standard.



	$\epsilon_{m,min}$ [-]	$\epsilon_{m,max}$ [-]	β [-]	γ [-]
NEW_EN_G	0.35	0.7	-	-
CAL_1	0.36	0.66	77	480
CAL_2	0.38	0.53	1	500

Fig. 7 | Confronto tra le curve di emissività ottenute per le due differenti calibrazioni, (CAL_1, CAL_2) e il NEW_EN_G

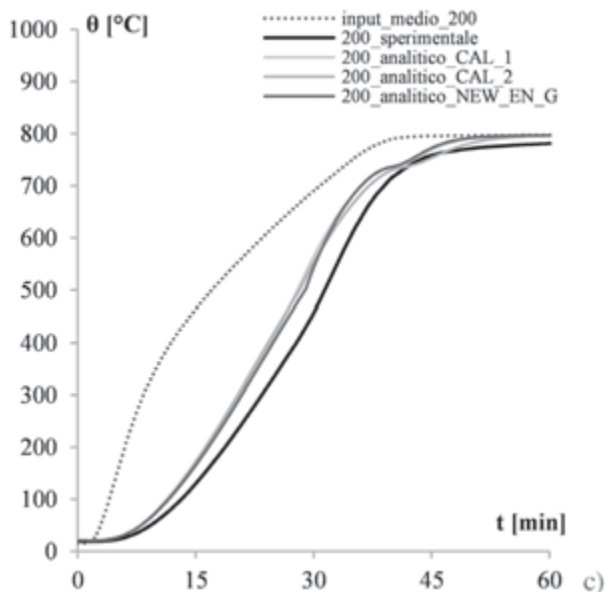
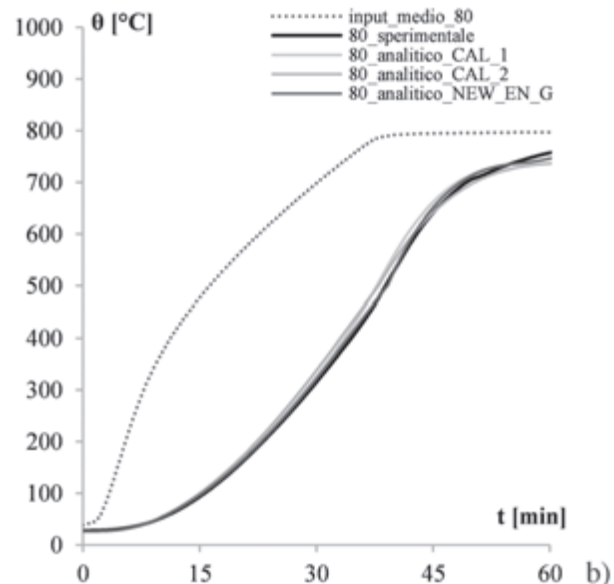
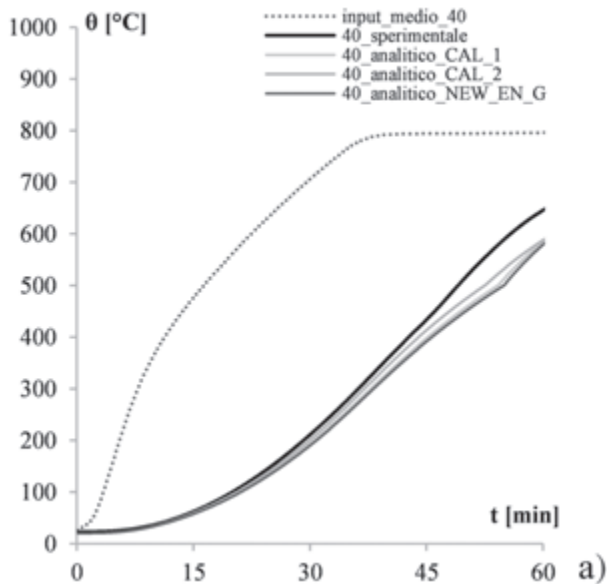


Fig. 8 | Confronto tra risultati analitici e sperimentali per i campioni con stesso A_m/V : (a) 40 m^{-1} , (b) 80 m^{-1} , e (c) 200 m^{-1} .

5. VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DELLA ZINCATURA UTILIZZANDO CURVE DI INCENDIO NATURALI

Nell'ambito del nuovo codice di prevenzione incendi, la resistenza al fuoco è definita come una misura di protezione passiva, da perseguire al fine di garantire la capacità portante della struttura e la capacità di compartimentazione per gli elementi di separazione, in accordo ai diversi livelli di prestazione, scelti dal progettista al fine di raggiungere dei predefiniti obiettivi di sicurezza antincendio. La norma italiana, in accordo con quella europea, definisce cinque livelli di prestazione (LP), da scegliere in relazione al rischio di incendio delle opere da costruzione; ad esempio, nel caso degli edifici industriali, è possibile utilizzare il LPI e il LPII.

In particolare, nel LPI deve essere dimostrata l'assenza di conseguenze esterne dovute al collasso strutturale, mentre nel secondo il LPII la struttura deve anche mantenere la sua capacità di resistenza al fuoco per un periodo di tempo sufficiente per l'evacuazione degli occupanti in un luogo sicuro all'esterno della costruzione.

Al fine di soddisfare il livello di prestazione fissato, è possibile utilizzare diverse soluzioni progettuali basate su approcci prescrittivi (soluzioni conformi) o basate sulle prestazioni (soluzioni alternative). La differenza principale tra l'approccio prescrittivo e quello prestazionale è che il primo è basato su prove di resistenza al fuoco standard o su metodi di calcolo empirici, e prevede l'utilizzo di curve di incendio nominali. In particolare, il codice fornisce tre tipologie di curve di incendio nominali (standard ISO 834, idrocarburi e curva nominale esterna), selezionate in base alla natura dei materiali combustibili presenti nel compartimento. D'altra parte, l'approccio prestazionale considera la complessità delle strutture nella loro interezza e l'interazione tra le varie misure e sistemi di sicurezza antincendio, utilizzando specifiche curve di incendio naturale, generalmente ottenute da analisi termo-fluidodinamiche avanzate.

La prima fase del progetto con l'approccio prestazionale consiste nella scelta degli input termici attraverso la selezione degli scenari di progetto, che rappresentano una descrizione qualitativa dello sviluppo dell'incendio, sulla base degli aspetti chiave che caratterizzano l'incendio reale (ad esempio, dimensioni del compartimento, ventilazione, carichi di incendio...). Le curve di incendio naturale possono essere ottenute attraverso modelli semplificati o avanzati. Uno dei metodi più semplici, descritto nell'allegato A dell'Eurocodice EN1991-1-2 [12], è quello delle "curve di incendio parametriche", il quale rappresenta uno strumento semplice che consente di modellare l'incendio post-flashover, assumendo una distribuzione uniforme della temperatura nel compartimento. Nei paragrafi successivi, l'incendio naturale è stato descritto secondo il suddetto modello di incendio parametrico.

5.1 Curve di incendio parametriche

Le curve in incendio parametriche sono funzioni analitiche che forniscono l'evoluzione della temperatura dei gas in un compartimento antincendio in funzione del tempo, sulla base dei parametri fisici che influenzano lo sviluppo di un incendio in un compartimento. Infatti, le curve parametriche tengono conto delle dimensioni del compartimento, del carico di incendio relativo alla superficie del compartimento (q_{fd}), delle condizioni di ventilazione attraverso il fattore di ventilazione "O" e delle proprietà termiche degli elementi di chiusura del compartimento (per es. i muri). Le curve di incendio parametrico sono caratterizzate da un tratto con temperature crescenti fino al valore massimo, seguito da un tratto di raffreddamento. Questo metodo semplificato considera la diversa evoluzione della temperatura basata sul concetto di incendio controllato da combustibile o incendio controllato dalla ventilazione. In particolare, nel presente lavoro, il fattore di ventilazione "O" è stato considerato uguale a 0,02, 0,04 e 0,09 $m^{1/2}$, mentre il carico di incendio pari a 500 MJ/m².

Nei paragrafi successivi, le diverse curve di incendio parametriche vengono riportate in funzione del corrispondente O ed indicate come (P_o) - vedi figura 9. Da questa figura si può osservare che, nel caso di un incendio controllato dalla ventilazione, la durata dell'incendio aumenta con il diminuire del fattore di ventilazione, O, mentre il picco di temperatura aumenta con l'aumentare di O, a parità di tutti gli altri parametri. Inoltre, la figura 9 mostra che, per un intervallo di tempo compreso tra 0 e 26 minuti, la curva

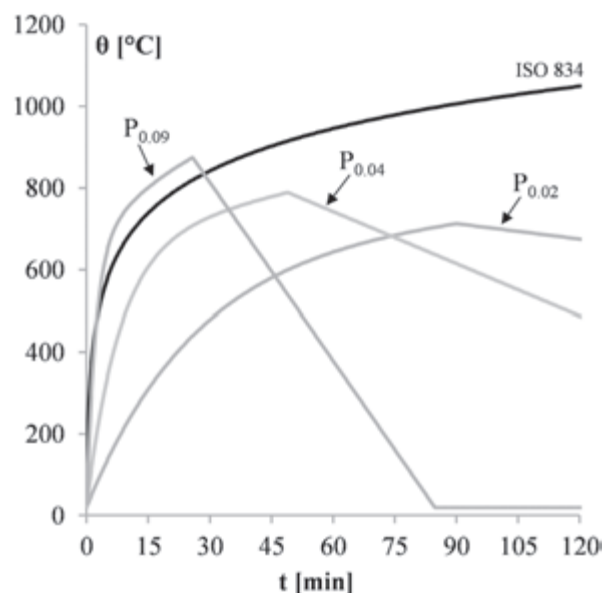


Fig. 9 | Confronto tra la curva di incendio nominale standard ISO834 e le curve parametriche.

parametrica P_{0.09} ha temperature superiori a quelle della ISO 834, sottolineando l'importanza di valutare la resistenza al fuoco della struttura con l'approccio prestazionale.

5.2 Effetto della zincatura sulla temperatura degli elementi zincati

Al fine di valutare l'efficienza della zincatura degli elementi in acciaio, variando la curva di incendio e il fattore di sezione A_m/V , è stata nuovamente implementata l'equazione (1) andando a modellare l'effetto della zincatura sulla temperatura dell'acciaio utilizzando l'approccio semplificato a due fasi (NEW_EN_G). Come detto in precedenza, a parità di q_{fd} , il valore di O condiziona la velocità di crescita della curva di temperatura; pertanto, per studiare l'effetto di questo differente riscaldamento sull'elemento in acciaio zincato che è maggiormente evidente nella prima parte del transitorio termico, di seguito vengono discussi i risultati ottenuti con le curve parametriche P_{0.02}, P_{0.04}, P_{0.09} aventi differenti velocità di riscaldamento (figura 9).

In questa prima fase i risultati vengono valutati in termini di temperature dell'acciaio, utilizzando un coefficiente di efficienza di temperature η_θ , in termini appunto di differenza di temperatura, calcolato come segue:

$$\eta_\theta = \frac{\theta_{a,NG} - \theta_{a,G}}{\theta_{a,NG}} \quad (6)$$

dove $\theta_{a,NG}$ è la temperatura dell'acciaio dell'elemento non zincato e $\theta_{a,G}$ è la temperatura di quello zincato, fissando sia il fattore di sezione A_m/V ed il tempo di esposizione t.

La figura 10 mostra quattro diverse superfici che rappresentano il coefficiente η_θ al variare del fattore di sezione A_m/V e del tempo t. Ciascuna superficie è riferita, rispettivamente, alla curva di incendio standard ISO 834 ed alle curve di incendio parametrico P_{0.02}, P_{0.04}, P_{0.09}.

La figura 10 conferma che l'efficacia protettiva della zincatura nei confronti delle alte temperature dipende dal valore di A_m/V

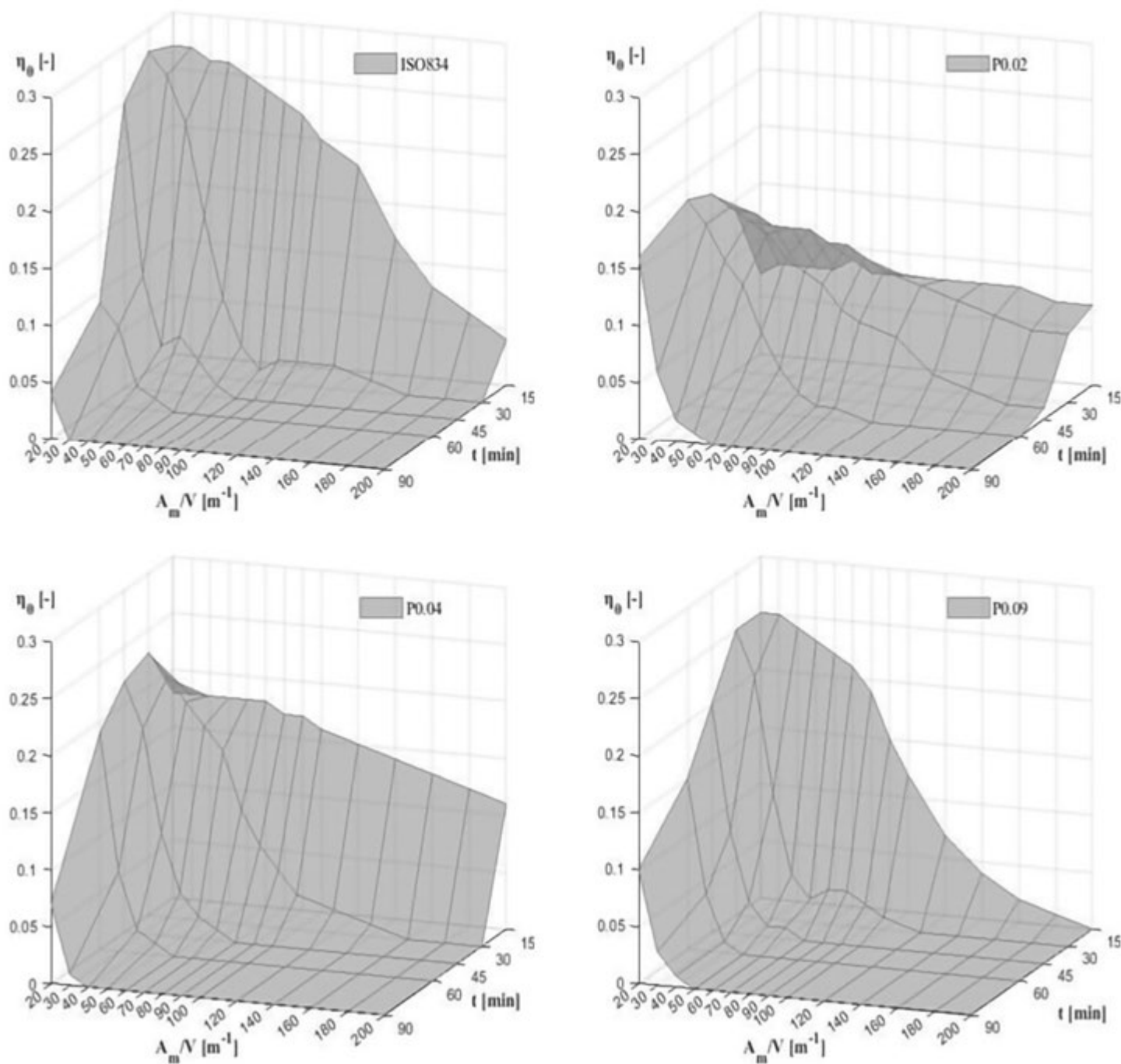


Fig. 10 | Coefficiente di efficienza delle temperature η_0 usando la curva di incendio ISO 834 e le differenti curve di incendio parametriche calcolate per un $q_{in}=500 \text{ MJ/m}^2$.

così come dalla curva di incendio utilizzata. In particolare, per la curva di incendio standard ISO 834, l'efficacia è apprezzabile maggiormente per i fattori di sezione A_m/V bassi e per un tempo di esposizione t pari a 15 o 30 minuti. In particolare, a 15 minuti per i valori di A_m/V che vanno da 20 a 120 m^{-2} , η_0 varia da 0,27 a 0,18, mentre da 120 m^{-2} inizia a diminuire più velocemente fino a raggiungere un valore di η_0 quasi prossimo allo zero per $A_m/V=200 \text{ m}^{-2}$.

A $t = 30$ minuti questa diminuzione repentina di η_0 inizia per valori di A_m/V inferiori; pertanto, già per $A_m/V= 60 \text{ m}^{-2}$ otteniamo un η_0 quasi prossimo allo zero. Spostandosi verso tempi di esposizione maggiori, il campo di applicabilità della zincatura diventa relativo soltanto ad A_m/V molto bassi.

Passando dalla curva di incendio nominale standard a quelle naturali, l'effetto della zincatura è apprezzabile per un campo più ampio di tempi di esposizione all'incendio e di fattori di sezione. Quest'ultimo aspetto è legato alla diversa velocità di riscaldamento delle curve di input; più piccolo è il fattore di ventilazione O più grande è il campo di effetto della zincatura, ma con valori più bassi di η_0 a causa delle temperature più basse raggiunte nell'acciaio. Ad esempio, nel caso della curva parametrica più lenta, $P_{0,02}$, a 15 minuti, il valore di η_0 non è influenzato significativamente da A_m/V , mentre muovendosi a 30 minuti, η_0 inizia ad aumentare e il campo di applicabilità della zincatura diventa correlato al valore di A_m/V . Questa dipendenza è più evidente spostandosi verso tempi maggiori, con un aumento di η_0 .

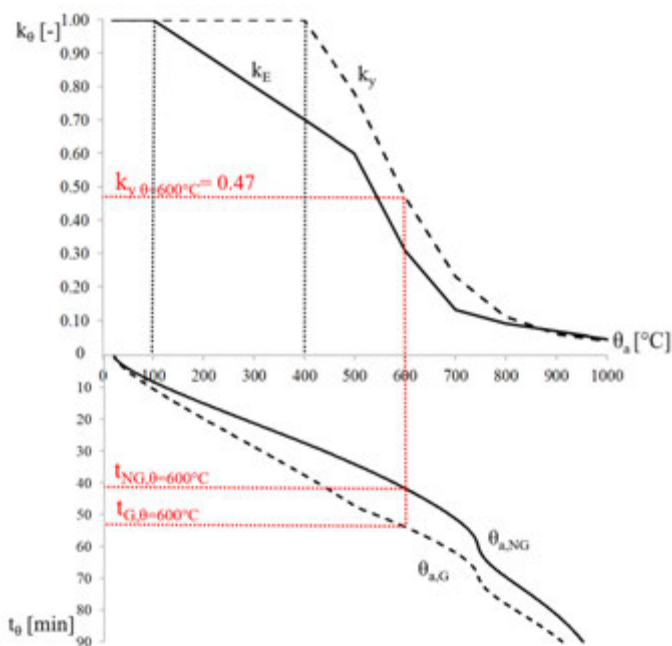


Fig. 11 | Identificazione del tempo al quale le temperature selezionate (ed es. 600°C) sono raggiunte nell'acciaio zincato (t_{θ}^G) e non zincato (t_{θ}^{NG})

standard ISO 834, η_0 cresce ancora di più, riducendo nuovamente l'effetto della zincatura su A_m/V . Tuttavia, anche se questa curva di incendio è superiore alla curva ISO 834, è caratterizzata da un ramo di raffreddamento, che permette di avere un effetto residuo a 60 minuti e 90 minuti anche se solamente per $A_m/V = 20$ e 30 m^{-1} .

5.3 Effetto della zincatura sulla resistenza al fuoco di elementi in acciaio

Il campo termico che nasce in un elemento strutturale esposto all'incendio determina una variazione delle caratteristiche termiche e meccaniche del materiale strutturale. I fattori di riduzione $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ indicano che la tensione di snervamento dell'acciaio non patisce riduzione fino ad una temperatura di 400°C, dopodiché la tensione di snervamento decresce con l'aumentare della temperatura: ad una temperatura di circa 600°C, l'acciaio ha perso circa il 50% della sua resistenza.

La riduzione del modulo elastico dell'acciaio inizia, invece, già a 100°C (20% a 300 °C e 60% a 500 °C - vedi figura 11).

Al fine di quantificare l'effetto benefico della zincatura nelle verifiche strutturali, è stato studiato il comportamento dell'elemento in acciaio zincato rispetto a quello non zincato alle temperature descritte in precedenza, in particolare sono state scelte 100, 300, 400, 500 e 600°C. Per ciascuna di queste temperature dell'acciaio

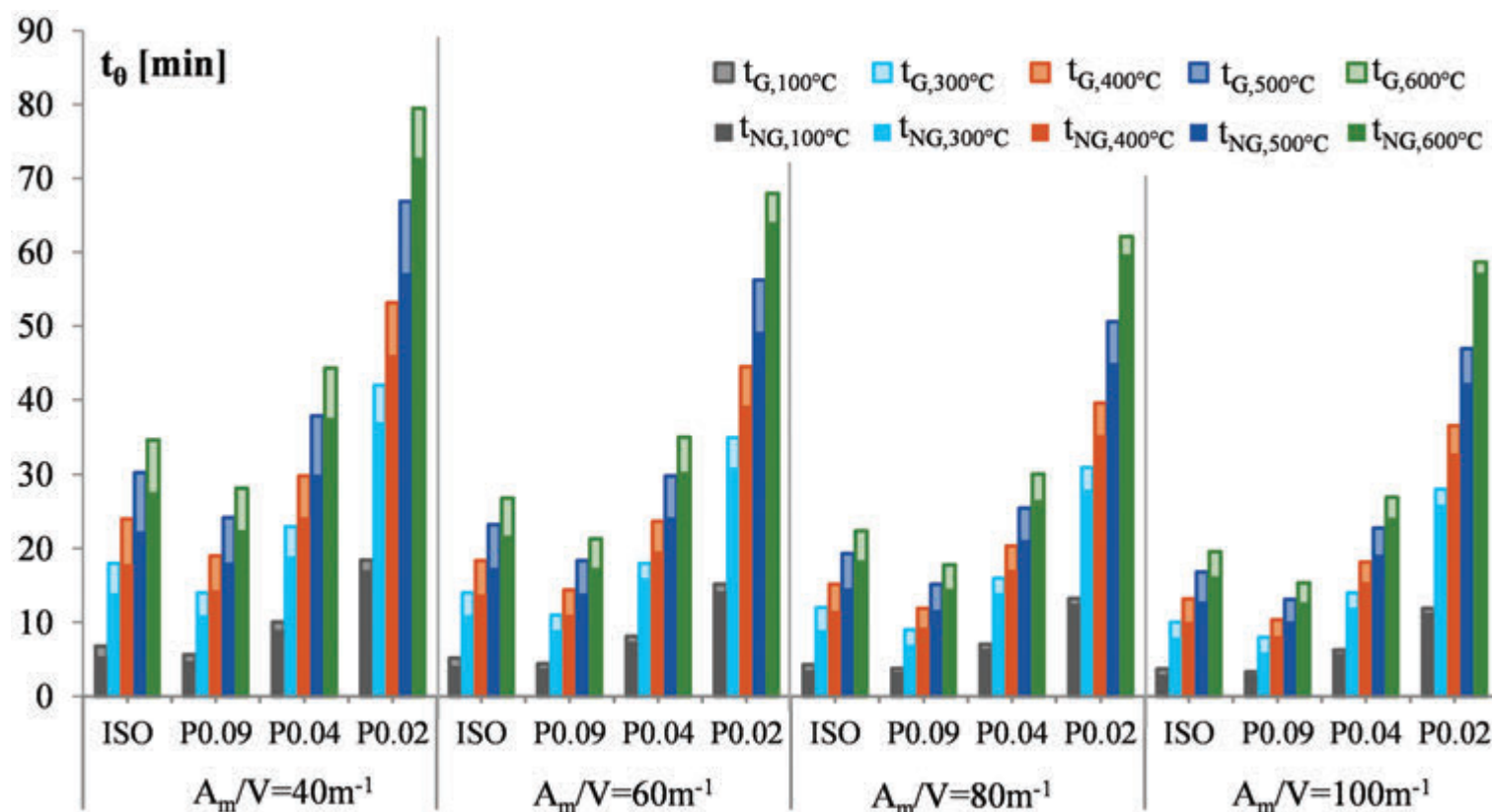


Fig. 12 | Rappresentazione di t_{θ} al variare di A_m/V e della curva di incendio per i provini zincati e non zincati

Considerando la curva di incendio $P_{0.04}$, le temperature raggiunte e η_0 aumentano e per cui l'effetto della zincatura, da 30 minuti in poi, diventa significativo per A_m/V tra 20 e 120 m^{-1} . Nel caso dell'ultima curva parametrica $P_{0.09}$, caratterizzata da una velocità di riscaldamento più veloce rispetto alla curva di incendio

sono stati ricavati i tempi ai quali queste temperature vengono raggiunte nell'elemento zincato ($t_{G,\theta}$) e in quello non zincato ($t_{NG,\theta}$). I valori dei tempi così ottenuti vengono rappresentati in figura 12 per quattro valori di A_m/V e nel caso delle precedenti curve di incendio analizzate ($P_{0.02}$, $P_{0.04}$, $P_{0.09}$ e curva nominale standard

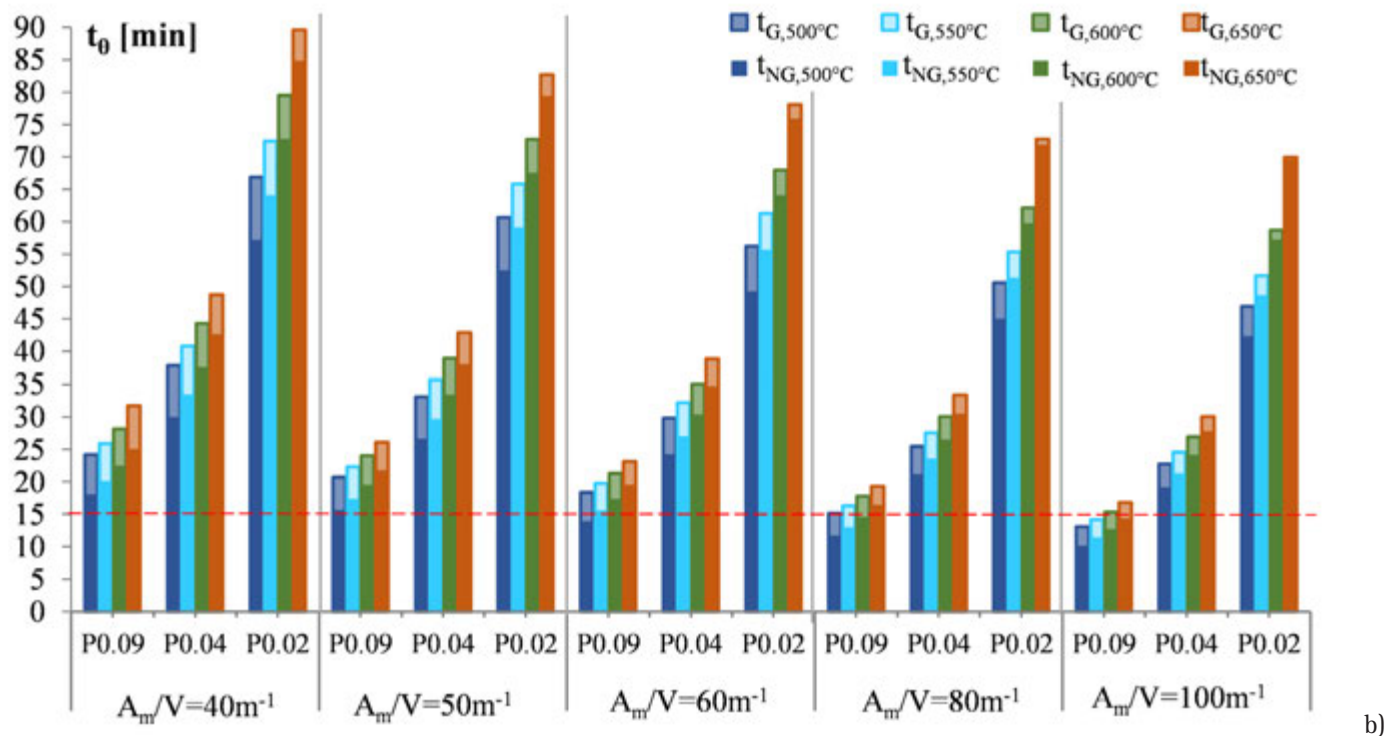
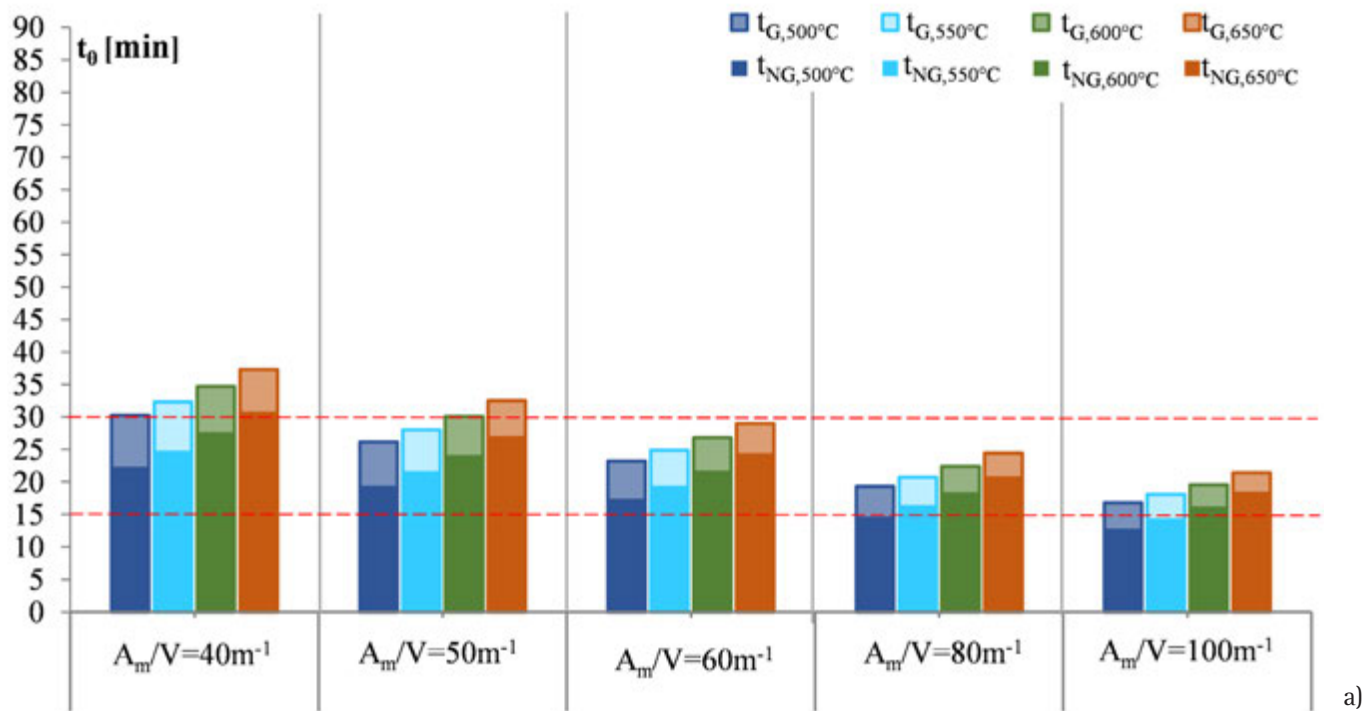


Fig. 13 | Rappresentazione di t_0 al variare di A_m/V e della curva di incendio per i provini zincati e non zincati (a) curva di incendio nominale standard ISO 834, (b) curve di incendio parametriche

ISO 834). Pertanto, è possibile osservare l'effetto di A_m/V sul riscaldamento dell'elemento strutturale; infatti, maggiore è A_m/V ed inferiore è il tempo per raggiungere una certa θ_a . Inoltre, è possibile anche osservare che per ogni A_m/V , $t_{G\theta}$ è sempre superiore a $t_{NG\theta}$; ciò significa che una certa temperatura θ_a viene raggiunta più tardi nel caso di un elemento in acciaio zincato, rispetto a quello non zincato; questo effetto si riduce con l'aumento di

A_m/V . È possibile anche individuare, per ogni A_m/V , una tendenza simile. In particolare, considerando $A_m/V = 40 \text{ m}^{-1}$, per una curva di incendio più lenta, t_0 aumenta e l'effetto della zincatura può essere maggiormente apprezzato. Inoltre, fissando la curva di incendio, l'effetto massimo può essere osservato tra 400 e 500 °C confermando i risultati sperimentali secondo i quali l'effetto della zincatura era massimo a circa 450 °C. Vale la pena notare che anche

se a 100°C l'effetto benefico è minore, può essere significativo al fine di ritardare i fenomeni di instabilità dell'elemento in acciaio. La zincatura è spesso utilizzata per proteggere dalla corrosione gli edifici in acciaio come quelli industriali; a questi ultimi, il codice di prevenzione incendi richiede di soddisfare il livello di prestazione II. In accordo all'approccio prescrittivo, utilizzando la curva di incendio standard ISO 834, la struttura deve mantenere la sua capacità portante per un periodo di tempo minimo, che viene ricavato in relazione al valore del carico di incendio della struttura; in questo articolo sono stati considerati due tempi, pari a 15 e 30 minuti.

Mentre l'approccio prestazionale, utilizzando una curva di incendio naturale, prevede che la struttura mantenga la sua capacità portante per un periodo di tempo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in un luogo sicuro (RSET- required safe escape time). In particolare, il tempo di collasso strutturale deve essere superiore a 2·RSET con un minimo di 15 minuti. Quindi, sulla base di tutte le considerazioni precedenti, l'effetto della zincatura può essere ritenuto rilevante in questi intervalli di tempo.

La figura 13 rappresenta un focus sull'intervallo di temperature compreso tra 500 e 650 °C. Nel caso della curva di incendio standard ISO 834 (figura 13a), la quale viene generalmente utilizzata per valutare la resistenza al fuoco di un singolo elemento strutturale nell'ambito dell'approccio prescrittivo, l'effetto della zincatura può essere apprezzato sia per A_m/V bassi (ad es. 40, 50 m^{-1}) a $t_0=30$ min e sia per A_m/V maggiori (ad es. 60, 80 e 100 m^{-1}) a $t_0=15$ min. Mentre nel caso delle curve di incendio naturali (figura 13b), con riferimento a $t_0=15$ min, l'effetto della zincatura può essere apprezzato per tutti gli A_m/V considerati. Inoltre, adottando un approccio prestazionale è possibile cogliere l'effetto della zincatura sul comportamento dell'intera struttura attraverso modellazioni termo-meccaniche avanzate. Infatti, da un lato il riscaldamento più lento legato a tale effetto consente di tener conto di una complessiva diminuzione delle azioni iperstatiche e dall'altro consente una riduzione più contenuta della rigidità con capacità da parte della struttura di ridistribuire le sollecitazioni durante l'incendio.

6. CONCLUSIONI

Il presente articolo illustra un programma sperimentale finalizzato all'indagine del comportamento degli elementi in acciaio zincato a caldo alle alte temperature e alla caratterizzazione della loro emissività superficiale ricavata a partire dalle temperature misurate durante una campagna di prove in piccola scala condotte in un comune forno elettrico.

Per avere una valutazione dettagliata del comportamento dell'acciaio zincato, il programma sperimentale include un range di fattori di sezione (A_m/V) compreso tra 20 e 200 m^{-1} , testando sia piastre di acciaio zincate che non zincate con una curva di input più lenta di quella di incendio standard ISO 834. Le temperature registrate nei provini zincati a caldo sono minori di quelle dei provini non zincati, confermando l'effetto benefico della zincatura. Al fine di calcolare l'emissività della superficie, a partire dalle temperature sperimentali dell'ambiente del forno e dell'acciaio zincato, è stato implementato il metodo analitico per il calcolo del campo termico all'interno degli elementi in acciaio, suggerito

anche dall'Eurocodice, utilizzando un coefficiente di convezione specifico per questa configurazione sperimentale. In questo modo sono state calibrate due curve di emissività, che confermano che l'emissività dell'acciaio zincato dipende dalla temperatura dell'acciaio, utilizzabili per calcolare la temperatura dell'acciaio esposto all'incendio applicando il suddetto metodo analitico o metodi numerici. I risultati ottenuti, molto simili a quelli ricavati applicando l'approccio semplificato a due fasi basato su prove sperimentali condotte con la curva nominale standard, hanno permesso di dimostrare che queste formulazioni di emissività possono essere utilizzate anche per curve di incendio diverse da quella standard.

Partendo dalle formulazioni calibrate sulla base delle prove sperimentali, la seconda parte dell'articolo presenta una valutazione analitica dell'effetto della zincatura variando sia le curve di incendio che i fattori di sezione. I risultati in termini di coefficiente di efficienza della temperatura mostrano che l'efficacia della zincatura nel ridurre la temperatura dell'acciaio dipende dalle curve di incendio di input e dal fattore di sezione. In particolare, per la curva di incendio standard ISO 834, l'effetto della zincatura è maggiormente apprezzabile per i fattori di sezione bassi e per tempi di esposizione all'incendio da 15 a 30 minuti. Al contrario, nel caso delle curve di incendio naturale, una fascia più ampia di fattori di sezione può beneficiare di questo effetto, per un tempo maggiore di esposizione all'incendio.

Valutando l'effetto della zincatura sulla prestazione degli elementi d'acciaio in condizioni di incendio, è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- una temperatura "target" (ad esempio la temperatura critica dell'elemento strutturale) viene raggiunta nell'elemento zincato sempre dopo rispetto a quello non zincato; questo effetto si riduce con l'aumento del fattore di sezione;
- per le curve di incendio naturale più lente della curva nominale standard, il tempo necessario per raggiungere una prefissata temperatura aumenta e l'effetto della zincatura può essere maggiormente apprezzato;
- fissando la curva di incendio, l'effetto massimo della zincatura può essere osservato tra 400 e 500 °C, confermando i risultati sperimentali in cui l'effetto della zincatura è massimo a circa 450 °C;
- anche se a 100 °C l'effetto benefico della zincatura è minore, può essere comunque significativo per ritardare i fenomeni di instabilità;
- modellare l'effetto della zincatura può essere utile non solo per valutare la resistenza al fuoco dei singoli elementi strutturali nell'ambito di un approccio prescrittivo, ma anche nell'applicazione dell'approccio prestazionale. Infatti, secondo quest'ultimo approccio è necessario condurre un'analisi termo-meccanica dell'intera struttura, per cui il riscaldamento più lento negli elementi in acciaio zincato può svolgere un ruolo rilevante anche sul comportamento strutturale durante tutto il transitorio termico, riducendo le azioni indirette e influenzando la ridistribuzione delle tensioni e delle sollecitazioni dipendenti anche dalle variazioni di rigidità dei componenti strutturali e delle espansioni termiche associate al differente campo termico. Ulteriori aspetti che potrà essere utile investigare includono da

un lato altre prove sperimentali alle alte temperature in piccola scala per studiare l'effetto di parametri aggiuntivi, come le diverse condizioni superficiali, dall'altro prove di incendio su elementi in scala reale utilizzando anche condizioni di riscaldamento diverse (ad es. curve di incendio con diverse velocità di riscaldamento). In ogni caso la possibilità di modellare l'effetto della zincatura semplicemente adottando un'opportuna legge per l'emissività superficiale (a due fasi) nella valutazione dei campi termici

consente di utilizzare gli usuali metodi di calcolo della resistenza al fuoco degli elementi strutturali e delle strutture. In tale ambito, futuri sviluppi della ricerca riguarderanno la messa a punto di metodi semplificati per il calcolo della resistenza al fuoco di singoli elementi di acciaio zincato (tabelle di pronto impiego, nomogramma, metodi analitici) e lo sviluppo di esempi applicativi inerenti a strutture di acciaio zincato nell'ambito sia dell'approccio prescrittivo che dell'approccio prestazionale.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito di un'attività di ricerca, ancora in corso, condotta presso il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura (Di.St.) dell'Università degli Studi di Napoli Federico II in collaborazione con l'Associazione Italiana Zincatura (AIZ). Si ringrazia in particolare l'ing. Lello Pernice di AIZ per il supporto tecnico e la fornitura dei provini. Gli autori inoltre ringraziano l'ing. Emanuele Scaiella e tutti i tecnici del laboratorio di strutture del Di.St. per l'assistenza nell'esecuzione delle prove sperimentali.

Bibliografia

- [1] Pernice L. (2021). Zincatura a caldo. Mirapromotion Srl. (In Italian)
- [2] ISO 14713-2:2009, Zinc coatings – Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures – Part 2: Hot dip galvanizing
- [3] EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules -Structural fire design, 2005.
- [4] Sala A. (1986) . Radiant properties of materials: Tables of radiant values for black bodies and real materials, Elsevier Science Ltd.
- [5] Gaigl C., (2019). Fire resistance of hot-dip galvanized steel structures, PhD Thesis, Technical University of Munich.
- [6] Jirku J., Wald F., (2013). Influence of zinc coating to a temperature of steel members in fire, in ASFE'13 - Application of Structural Fire Engineering, 19-20 April 2013, Prague, Czech Republic.
- [7] Bihina G., Zhao B. (2021). Hot dip galvanizing of steel structural members: an alternative to passive fire insulation? Ce/papers 4, Proceedings of Eurosteel 2021: 1-3 September 2021, Sheffield, England.
- [8] Autiero M., Bilotta A., de Silva D., Nigro E., Pernice L. (2021). Temperature of galvanized steel specimens heated in electrical furnace, in ASFE 2021 - Applications of Structural Fire Engineering, 10-11 June 2021, Lubiana, Slovenia. Paper Id. 62, 6 pp.
- [9] Gaigl C., Mensinger M., (2016). The temperature development of hot dip galvanized steel members in fire, in 22nd Hot Dip Galvanizing Conference, 18-20 October 2016, Mikulov, Czech Republic.
- [10] Gaigl C., Mensinger M., (2017). Hot dip galvanized steel constructions under fire exposure, in FireSS 2017 - 2nd International Fire Safety Symposium, 7-9 June 2017, Naples, Italy. p. 557-564.
- [11] Gaigl C., Mensinger M., (2018). Fire resistance of galvanized structures, in 25th International Galvanizing Conference, Berlin.
- [12] EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire, 2002.
- [13] Elich, J. and Hamerlinck, A. (1990). Thermal radiation properties of galvanized steel and its importance in enclosure fire scenarios, Fire Safety Journal, vol. 16, pp. 469-482.
- [14] D.M. 3 agosto 2015 "Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139", GU n. 192 del 20/8/2015 – S.O. n. 51.



Margherita Autiero

Laureata in Ingegneria strutturale e geotecnica, è attualmente dottoranda di ricerca in Ingegneria strutturale, geotecnica e rischio sismico, presso L'Università di Napoli Federico II. I suoi interessi di ricerca sono lo studio del comportamento in condizioni di incendio di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo. Durante il percorso di formazione ha approfondito il comportamento sperimentale e numerico delle strutture in acciaio zincate a caldo e il suo tema di dottorato riguarda il comportamento in condizioni di incendio dei magazzini autoportanti verticali, con approccio prescrittivo e prestazionale.



Donatella de Silva

È assegnista di ricerca presso l'Università di Napoli Federico II, Italia. È Ingegnere strutturista e i suoi interessi di ricerca riguardano il comportamento alle alte temperature di strutture in acciaio, calcestruzzo e composte acciaio-calcestruzzo, mediante simulazioni numeriche e prove sperimentali. È inoltre impegnata in numerosi progetti nazionali ed internazionali, riguardanti la prevenzione incendi, la resistenza al fuoco di strutture ed infrastrutture con approccio prestazionale, sia dal punto di vista fluido-dinamico che strutturale ed il comportamento dei materiali protettivi antincendio con curve naturali.



Antonio Bilotta

Professore associato di Ingegneria Strutturale, è autore di oltre 150 lavori (di cui più di 30 su riviste internazionali peer reviewed) incentrati principalmente sui seguenti temi: (i) rinforzo di strutture esistenti in calcestruzzo armato con polimeri fibrorinforzati (FRP), (ii) effetti dell'incendio su strutture in calcestruzzo armato con barre FRP o rinforzato con sistemi FRP, (iii) effetti del terremoto sulle strutture, (iv) tecniche di identificazione dinamica dei ponti nel dominio della frequenza e tecniche di machine learning nel dominio del tempo. Ha partecipato e coordinato diversi progetti di ricerca per l'Università di Napoli Federico II finalizzati allo sviluppo di metodologie e tecnologie per la gestione e la riqualificazione dei centri storici, per la sicurezza dei sistemi urbani, per la gestione del rischio e la sicurezza delle infrastrutture a scala regionale, per il sistema di monitoraggio intelligente per la sicurezza delle infrastrutture urbane.



Emidio Nigro

Professore ordinario di Tecnica delle Costruzioni presso l'Università di Napoli Federico II, è autore di circa 400 articoli scientifici. I più recenti temi di ricerca riguardano: sicurezza antincendio e comportamento al fuoco di strutture in acciaio/c.a./composte acciaio-calcestruzzo, di strutture di calcestruzzo armate con barre in FRP e di gallerie, nonché di sistemi di protezione passiva antincendio; vulnerabilità ed adeguamento strutturale e sismico di strutture ed infrastrutture; rinforzo strutturale con FRP; progettazione di strutture di acciaio/c.a./composte. È attivo in vari comitati tecnico-scientifici e normativi, in ambito CEN, UNI (CT 021-Ingegneria strutturale), fib (strutture composte; fuoco), RILEM, CNR (FRP), COST (progetti europei su eventi catastrofici e fuoco), ACI/ACI-Italy Chapter. È coordinatore del Gruppo di Lavoro GL01 (progettazione strutturale contro l'incendio) nell'ambito della Commissione UNI-CT 021 e coordinatore della Commissione per la Sicurezza di Costruzioni in Acciaio in caso d'Incendio (istituita da Fondazione Promozione Acciaio).

Progettazione sismica di sistemi lightweight steel framing nella seconda generazione dell'Eurocodice 8

Seismic design of lightweight steel framing systems in second generation of eurocode 8

Prof. Raffaele Landolfo*, Prof. Luigi Fiorino

Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università di Napoli Federico II

L'attuale edizione dell'Eurocodice 8 (CEN 2004) non prevede esplicitamente la progettazione sismica di sistemi sismoresistenti basati sull'utilizzo di profili sottili formati a freddo in acciaio (profili CFS: Cold-Formed Steel), anche noti come sistemi LightWeight Steel Framing (LWSF). Nell'ultimo decennio sono state condotte approfondite ricerche sul comportamento sismico dei sistemi LWSF e lo stato dell'arte è ormai maturo per trovare una diretta applicazione nello sviluppo della nuova versione della norma sismica europea, attività che si inquadra nel più ampio processo di revisione di tutti gli Eurocodici, ormai in fase di conclusione. In tale contesto, questo articolo presenta le regole di progettazione sismica dei sistemi LWSF, largamente basate su ricerche svolte presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II. In particolare, in accordo all'attuale impostazione generale seguita dalla nuova norma sismica europea, le regole di progettazione introdotte per i sistemi LWSF includono le prescrizioni per ottenere il comportamento dissipativo dei sistemi sismoresistenti, la definizione dei coefficienti di comportamento e le indicazioni per l'applicazione dei criteri di gerarchia delle resistenze. La norma copre sistemi sismoresistenti LWSF realizzati con pareti in profili CFS controventate con piatti sottili in acciaio disposti ad X o pareti di taglio in profili CFS, ossia controventate con lamiere sottili o con pannelli in legno o cartongesso.

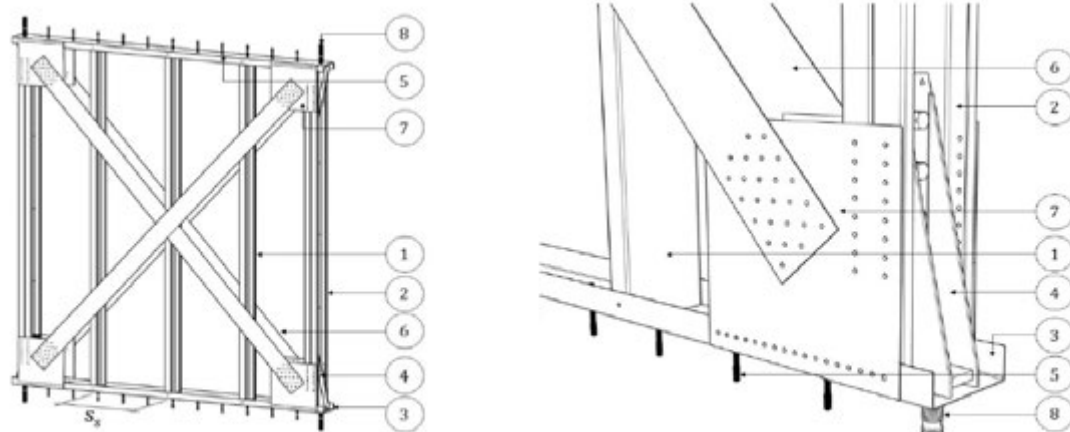
The current version of Eurocode 8 (CEN 2004) does not explicitly provide design rules for seismic resistant systems based on the use of thin cold-formed steel (CFS) profiles, also known as lightweight steel framing (LWSF) systems. Extensive research has been carried out in the past decade on this topic that provides a solid background for an update of the current provisions and the development of a new edition of the European seismic code. As part of the revision process of Eurocode 8, several activities are currently under development. Within this framework, this manuscript presents a set of design rules for the seismic design of LWSF systems largely based on background studies carried out at the University of Naples Federico II. The proposed design rules include provisions for achieving the dissipative behaviour of lateral force resisting systems, together with behaviour factor values and prescriptions for the application of capacity design criteria. Different types of LWSF systems are covered by the new edition of the code, namely CFS strap-braced walls and CFS shear walls braced with steel sheets, wood, or gypsum sheathings.

1 INTRODUZIONE

Gli edifici realizzati con struttura portante realizzata con profili in acciaio formati a freddo (profili CFS: cold-formed steel), conosciuti nel panorama nazionale con il nome di LightWeight Steel Framing (LWSF) o, semplicemente Light Steel Framing (LSF) sono essenzialmente costituiti da pareti di aste, organizzate in montanti e guide, che sostengono gli impalcati ottenuti affiancando travetti, sempre in CFS, disposti ad interasse pari a quello dei montanti. L'ossatura metallica delle pareti e dei solai è solitamente completata con vari tipi di rivestimenti che concorrono anche alla realizzazione dell'involucro dell'edificio. Le

costruzioni LWSF presentano una buona convenienza economica e ottime prestazioni in termini di sostenibilità rispetto alle soluzioni più tradizionali (Vitale et al 2018), caratteristiche, queste, che favoriscono un impiego sempre più diffuso di tali sistemi. Dal punto di vista della progettazione sismica, l'attuale quadro normativo nazionale (Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 2018) ed europeo (CEN 2004) non prevedono specifiche regole di progettazione per i sistemi LWSF, limitandone l'utilizzo in zona sismica. Infatti, volendo utilizzare le norme sismiche vigenti, solo i sistemi LWSF con controventi in piatti sottili potrebbero essere progettati come strutture definite a bassa dissipazione (chiamate

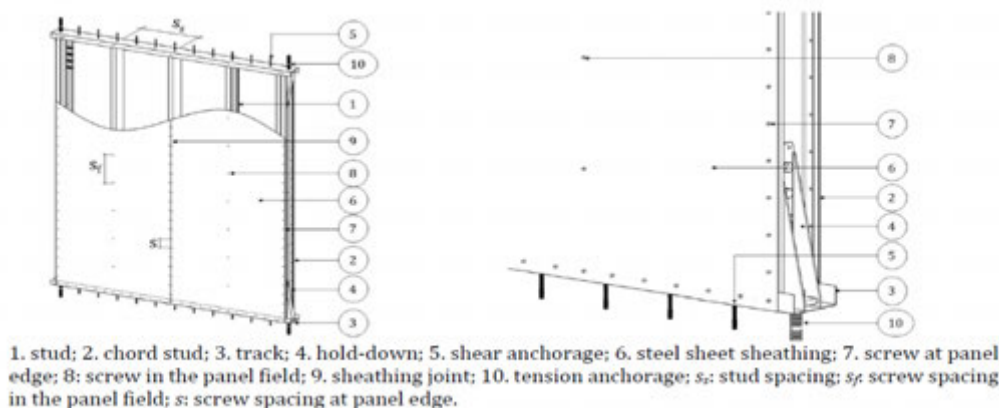
*Corresponding author. Email: raffaele.landolfo@unina.it



1. stud; 2. chord stud; 3. track; 4. hold-down; 5. shear anchorage; 6. steel strap brace; 7. connection of strap brace; 8. tension anchorage; s_s : stud spacing.

1. Montante; 2. Montante di corda; 3. Guida; 4. Hold-down; 5. Ancoraggio a taglio; 6. Piatto sottile di controventamento; 7. Collegamento di estremità del piatto sottile di controventamento; 8. Ancoraggio a trazione; S_s : interasse dei montanti

Fig. 1 | Pareti controventate con piatti sottili.



1. stud; 2. chord stud; 3. track; 4. hold-down; 5. shear anchorage; 6. steel sheet sheathing; 7. screw at panel edge; 8. screw in the panel field; 9. sheathing joint; 10. tension anchorage; s_s : stud spacing; s : screw spacing at panel edge.

1. Montante; 2. Montante di corda; 3. Guida; 4. Hold-down; 5. Ancoraggio a taglio; 6. Lamiera sottile; 7,9. Viti di collegamento lungo il bordo della lamiera sottile; 8. Viti di collegamento nella zona interna della lamiera sottile; 10. Ancoraggio a trazione; S_s : interasse dei montanti; s : interasse delle viti di collegamento lungo il bordo della lamiera sottile; S_s : interasse delle viti di collegamento nella zona interna della lamiera sottile.

Fig. 2 | Pareti di taglio controventate con lamiere sottili in acciaio.

dalla norma italiana a comportamento strutturale non dissipativo e dalla norma europea strutture di Classe di duttilità bassa, DCL) applicando un coefficiente di comportamento pari a 1,5 e, nel caso dell'Eurocodice 8, raccomandandone l'utilizzo solo in regioni a bassa sismicità.

Per l'Eurocodice 8, l'assenza di specifiche regole dedicate ai sistemi LWSF può essere giustificata dal grande divario accumulatosi negli anni tra i progressi scientifici e tecnologici e la norma, risalente ormai a più di quindici anni fa. Questo aspetto, insieme alle criticità emerse durante l'applicazione degli Eurocodici da parte dei progettisti nel corso degli anni, ha motivato la revisione dell'intero quadro normativo europeo sotto la guida del CEN/TC250 (CEN Technical Committee 250 "Structural Eurocodes").

Vale la pena ricordare che le regole di progettazione sismica per i sistemi LWSF sono già disponibili nella norma nordamericana "North American standard for seismic design of cold-formed steel

structures" (AISI S400, AISI 2015) che, attualmente adottata negli USA, Canada e Messico, rappresenta indubbiamente uno standard di riferimento.

In particolare, la norma AISI S400 segue il ben noto approccio basato sul criterio di gerarchia delle resistenze, prevedendo dunque la definizione degli elementi/meccanismi dissipativi/duttili e dei coefficienti di comportamento, e fornendo i requisiti di sovrarresistenza per gli elementi/meccanismi non dissipativi/fragili. Pertanto, ispirandosi in parte alla norma AISI S400 e sulla base delle informazioni disponibili nella letteratura pertinente e dei risultati di precedenti ricerche condotte dagli autori (Landolfo et al 2020,

Shakeel et al 2020, Shakeel et al 2019, Fiorino et al 2017), è stato possibile introdurre nella prossima edizione dell'Eurocodice 8 nuove regole per la progettazione sismica dei sistemi LWSF.

In questo articolo, dopo una breve descrizione delle caratteristiche

principali dei sistemi simoresistenti LWSF contemplati nella nuova edizione dell'Eurocodice 8, si esamineranno le regole di progettazione sismica presenti nelle principali norme attualmente disponibili e si illustrerà l'impostazione generale della futura normativa sismica europea. L'attenzione sarà poi focalizzata sulle specifiche regole di progettazione sismica per i sistemi LWSF, distinguendo le prescrizioni generali, comuni a tutte le tipologie, da quelle valide specificamente per ciascuno dei quattro sistemi simoresistenti previsti: pareti controventate con piatti sottili in acciaio ad X (figura 1), pareti di taglio controventate con lamiera sottili in acciaio (figura 2), con pannelli in legno, oppure in cartongesso.

2, Descrizione e comportamento sismico dei sistemi LWSF

L'ossatura portante dei sistemi LWSF è costituita da pareti e solai realizzati con profili CFS (cold-formed steel). Le pareti sono realizzate con montanti, ossia profili di spessore compreso solitamente tra 1 e 2 mm disposti verticalmente con interasse costante, le cui estremità superiori e inferiori sono collegate, solitamente con viti autopercoranti, a profili di chiusura, chiamati guide. In modo analogo, i solai sono costituiti da travetti equidistanti di spessore compreso solitamente tra 1 e 3 mm le cui estremità sono anch'esse delimitate da guide di chiusura. Sia le pareti che i solai sono rivestiti con lamiera metalliche di modesto spessore e/o con pannelli a base di legno, gesso e cemento. Nel caso dei solai, l'elemento di chiusura superiore dell'ossatura può anche essere realizzato con una soluzione mista in cui lamiera grecata di acciaio sono completate con pannelli o getto di calcestruzzo.

I sistemi simoresistenti più comunemente utilizzati sono le pareti controventate con piatti di spessore sottile compreso solitamente tra 1 e 2 mm disposti ad X (figura 1) e le pareti di taglio controventate con lamiera piane sottili in acciaio di spessore solitamente inferiore al millimetro (figura 2), o con pannelli in legno o cartongesso di spessore solitamente compreso tra 10 e 15 mm. Nel caso di pareti con piatti sottili disposti ad X il controventamento è garantito dalla sola diagonale tesa, poiché i piatti non sono in grado di reagire agli sforzi di compressione a causa dell'esiguo spessore. Nel caso delle pareti di taglio, il controventamento è garantito dal

comportamento a diaframma che si instaura grazie all'interazione tra il rivestimento e l'ossatura, che sono mutuamente collegati attraverso fissaggi meccanici, solitamente viti autopercoranti.

Qualunque sia il sistema controventante della parete, l'azione orizzontale di piano determina un momento ribaltante globale che viene equilibrato dalla coppia prodotta dagli sforzi assiali di trazione e compressione agenti nei montanti di estremità, detti anche montanti di corda. In particolare, il meccanismo con il quale si trasmettono le azioni orizzontali ai montanti di estremità vede coinvolta la diagonale tesa nel caso di parete controventata con piatti metallici disposti ad X (figura 3a), mentre nel caso di parete di taglio con pannelli (figura 3b), saranno coinvolti i fissaggi tra rivestimento e ossatura. Questi sforzi assiali di estremità saranno trasmessi alla parete sottostante, nel caso di un edificio multipiano, o alla fondazione. Nello specifico, lo sforzo di compressione si trasmetterà per contatto, mentre l'azione di trazione mediante un sistema di ancoraggio (elemento hold-down e ancoraggio a trazione).

L'equilibrio alla traslazione della parete è invece garantito dagli ancoraggi a taglio installati lungo le guide, che assicurano il trasferimento delle forze orizzontali dal solaio superiore alla parete, nel caso della guida superiore, e dalla parete al solaio inferiore o alla fondazione, nel caso della guida inferiore.

La progettazione sismica di questi sistemi condotta nell'ipotesi di comportamento strutturale dissipativo richiede, in primo luogo, l'individuazione degli elementi del sistema destinati alla dissipazione energetica. Nel caso delle pareti controventate con piatti sottili disposti ad X, l'elemento dissipativo è il piatto diagonale teso ed il meccanismo duttile è quello derivante dallo snervamento di tale piatto (figura 4a). Per le pareti di taglio controventate mediante il contributo dei pannelli di rivestimento in legno o cartongesso, gli elementi dissipativi sono rappresentati dai fissaggi tra rivestimento ed ossatura ed il loro collasso individua il meccanismo duttile (figura 4b). Nel caso specifico di rivestimento realizzato con lamiera piane sottili in acciaio, gli elementi dissipativi sono sempre rappresentati dai fissaggi tra rivestimento ed ossatura, ma a causa della formazione di bande diagonali di trazione nelle lamiere, solo quelli che appartengono a tali bande sono coinvolti nel meccanismo di collasso (figura 4c). Individuati gli elementi dissipativi, possono essere facilmente

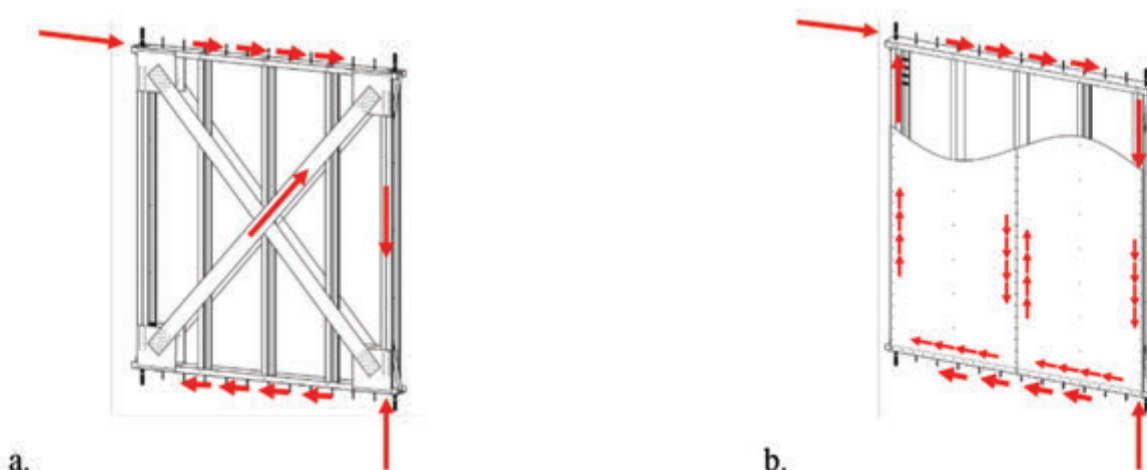


Fig. 3. | Trasferimento degli sforzi: a. Parete controventata con piatti sottili; b. Parete di taglio.

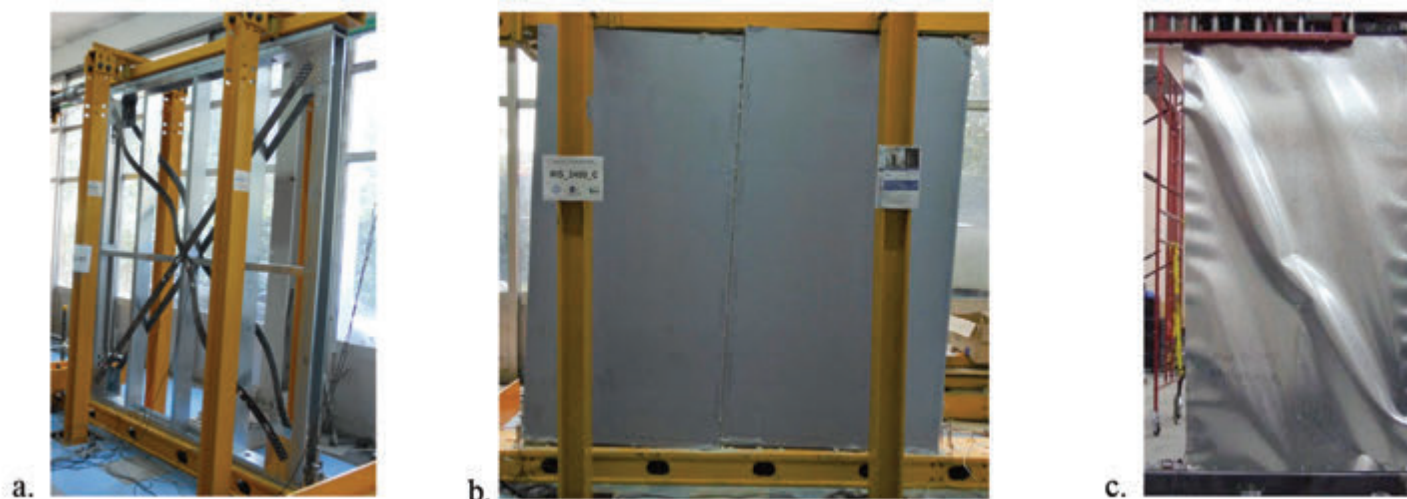


Fig. 4. | a. Parete controventata con piatti sottili soggetta allo snervamento del piatto diagonale teso (Landolfo 2019); b. Parete di taglio controventata con pannelli in cartongesso soggetta al collasso delle viti di collegamento tra pannelli e ossatura (Landolfo 2019); c. Parete di taglio controventata con lamiera sottile in acciaio soggetta al collasso delle viti di collegamento tra lamiera e ossatura che appartengono alla banda diagonale di trazione instauratasi nella lamiera (Yanagi e Yu 2014).

riconosciuti gli elementi che, al contrario, dovranno rimanere in campo elastico: collegamenti dei piatti sottili di controventamento, nel caso di pareti con piatti sottili; pannelli di rivestimento, nel caso di pareti di taglio; hold-down; ancoraggi a trazione e loro collegamenti; montanti di corda; guide; ancoraggi a taglio. Ovviamente, questi elementi non dissipativi devono essere progettati in accordo ai criteri di gerarchia delle resistenze al fine di evitare possibili meccanismi fragili.

3. Norme esistenti per la progettazione sismica dei sistemi LWSF

Nei sistemi LWSF l'ossatura metallica è costituita da montanti e guide che, a causa del loro piccolo spessore, rientrano solitamente nella tipologia di profili formati a freddo di Classe 4. Pertanto, la loro progettazione strutturale può essere condotta utilizzando le specifiche regole fornite dalle Norme tecniche nazionali (Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 2018), con particolare riferimento al paragrafo C4.2.12 (Profilati formati a freddo e lamiere grecate) della Circolare esplicativa (Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 2019), che si ispira principalmente alle Parti 1.3 (CEN 2006a) e 1.5 (CEN 2006b) dell'Eurocodice 3. Al contrario, come già introdotto in precedenza, la progettazione in zona sismica dei sistemi LWSF non trova riscontro nelle correnti norme sia in Italia che in Europa, e solo la norma nordamericana AISI S400 (AISI 2015) può essere considerata lo standard di riferimento per le applicazioni di questa tipologia strutturale in zona sismica.

La norma "North American standard for seismic design of cold-formed steel structures" (AISI S400, AISI 2015) è applicabile negli Stati Uniti, in Messico e in Canada. Essa copre sette diverse tipologie di sistemi sismoresistenti: telai con collegamenti bullonati trave-colonna (cold-formed steel special bolted moment frames); pareti di taglio rivestite con lamiere sottili in acciaio (cold-formed steel light frame shear walls with steel sheet sheathing) o pannelli a base di legno (cold-formed steel light frame shear walls sheathed with wood structural panels) o a base di gesso (cold-formed steel light frame shear walls with gypsum board or fiberboard panel sheathing) o combinazione di pannelli a base di legno e a base di gesso (cold-

formed steel light frame shear walls with wood-based structural panel sheathing on one side and gypsum board panel sheathing on the other side); pareti con piatti sottili di controventamento, queste ultime nelle due varianti con (cold-formed steel light frame strap braced wall systems) o senza (conventional construction cold-formed steel light frame strap braced wall systems) applicazione di criteri di progettazione dissipativa.

Per ciascuna tipologia, la norma fornisce i diversi parametri sismici necessari per la progettazione in accordo all'approccio utilizzato negli USA, in Canada ed in Messico. In particolare, per gli USA ed il Messico, in accordo alla norma ASCE 7 (Minimum design loads for buildings and other structures) (ASCE 2016), questi parametri includono il coefficiente di comportamento, chiamato Seismic force modification factors, R , il fattore di sovrarresistenza, Ω , ed il coefficiente di amplificazione dello spostamento, C_d ; mentre per il Canada, secondo quanto previsto dalla norma NBCC (National building code of Canada) (NRCC 2015), il coefficiente R viene fornito come prodotto delle aliquote correlate alla duttilità, R_d , e alla sovrarresistenza, R_o , e il coefficiente di sovrarresistenza è chiamato expected strength factor, Ω_e .

La norma AISI S400 fornisce le resistenze di progetto dei vari sistemi LWSF ottenute principalmente su base sperimentale e definisce il campo di applicabilità fornendo limitazioni sulle proprietà geometriche e meccaniche. Ad eccezione delle pareti con piatti sottili di controventamento chiamate "convenzionali" (conventional construction cold-formed steel light frame strap braced wall systems), per le quali la norma prevede un comportamento a bassa dissipazione, le regole progettuali seguono un approccio basato sul criterio di gerarchia delle resistenze, con la definizione degli elementi dissipativi, dei meccanismi duttili e della sovrarresistenza degli elementi non dissipativi. Una sintesi dei limiti di applicabilità e dei parametri sismici forniti dalla AISI S400 è fornita in tabella 1.

Tab. 1 | Limiti di applicabilità e parametri sismici forniti dalla AISI S400

Sistema sismoresistente	USA e Messico			Canada	
	Parametri sismici		Limitazioni sull'altezza dell'edificio e sulla pericolosità sismica	Parametri sismici	Limitazioni sull'altezza dell'edificio e sulla pericolosità sismica
	Sistemi a parete	Sistemi a telaio			
CFS light frame shear walls sheathed with wood structural panels	R=6,5 ($\Omega_0=3,0$ e $C_d=4,0$)	R=7 ($\Omega_0=2,5$ e $C_d=4,5$)	20 m per SDC D, E, F NP per SDC B, C	R=4,25 ($\Omega_E=1,33$ per pannelli DFP o OSB e $\Omega_E=1,45$ per pannelli CSP)	20 m
CFS light frame shear walls with steel sheet sheathing	R=6,5 ($\Omega_0=3,0$ e $C_d=4,0$)	R=7 ($\Omega_0=2,5$ e $C_d=4,5$)	20 m per SDC D, E, F NP per SDC B, C	R=2,60 ($\Omega_E=1,4$)	NP
CFS light frame strap braced wall systems	R=4,0 ($\Omega_0=2,0$ e $C_d=3,5$) NP per SDC B, C		20 m per SDC D, E, F	R=2,50	20 m
CFS special bolted moment frames	R=3,5 ($\Omega_0=3,0$ e $C_d=3,5$)		10 m per tutte le categorie	NP	NP
CFS light frame shear walls with wood-based structural panel sheathing on one side and gypsum board panel sheathing on the other side	NP		NP	R=2,55 ($\Omega_E=1,33$ per pannelli DFP o OSB e $\Omega_E=1,45$ per pannelli CSP)	20 m
CFS light frame shear walls with gypsum board or fiberboard panel sheathing	R=2,0 ($\Omega_0=2,5$ e $C_d=2,0$)	R=2,5 ($\Omega_0=2,5$ e $C_d=2,5$)	NP per SDC E, F 10 m per SDC D NP per SDC B, C	NP	NP
Conventional construction CFS light frame strap braced wall systems	NP		NP	R=1,56	15 m per $I_E F_a S_a(0,2) \leq 0,35$ e NP per $I_E F_a S_a(0,2) > 0,35$

NP: Non ammesso

SDC: Categoria sismica, *Seismic Design Category* (ASCE 2016)

I_E : Coefficiente di importanza sismica, *Earthquake importance factor* (NRCC 2015)

F_a : Coefficiente di sito, *Site coefficient* (NRCC 2015)

$S_a(0,2)$ Accelerazione spettrale con smorzamento del 5% per un periodo di 0,2s, *5% damped acceleration at 0,2s time period* (NRCC 2015)

DFP: compensato di abete Douglas

OSB: scaglie di legno orientate, *Oriented Strand Board*

CSP compensato di legno tenero canadese

4. Impostazione del nuovo Eurocodice 8

Nell'ottica dell'approccio multi-prestazionale, il nuovo Eurocodice 8 riferisce il grado di danneggiamento delle costruzioni a quattro diversi stati limite (Limit state: LS): stato limite di collasso incipiente (Near Collapse: NC); stato limite di danno significativo (Significant Damage: SD); stato limite di danno limitato (Damage Limitation: DL); stato limite di completa operatività (Fully Operational LS: OP). La nuova norma definisce in generale tre diversi comportamenti strutturali dissipativi, che corrispondono a tre classi di duttilità: comportamento strutturale a bassa dissipazione (DC1), comportamento strutturale a dissipazione media (DC2), comportamento strutturale ad elevata dissipazione (DC3). La classificazione è poi completata dalle strutture definite non dissipative, per le quali è ammesso esclusivamente un comportamento elastico lineare.

Nelle strutture ricadenti nella Classe di bassa dissipazione (DC1) viene presa in considerazione la sola sovrarresistenza strutturale intrinseca, mentre le capacità di deformazione anelastica, di dissipazione energetica e la sovrarresistenza dovuta alla redistribuzione plastica degli effetti dell'azione sismica sono trascurate. Pertanto, per la Classe DC1 non è richiesta l'applicazione di regole progettuali tese a favorire lo sviluppo di una risposta dissipativa.

Al contrario, nelle strutture di Classe DC2 e DC3 si tiene conto delle capacità locali di deformazione, dissipazione e sovrarresistenza, con un controllo del meccanismo plastico globale con regole di gerarchia delle resistenze meno stringenti per la Classe DC2 rispetto alla Classe DC3.

In aggiunta, nel caso di strutture ricadenti nelle Classi DC1 e DC2, la norma solitamente pone un limite all'entità dell'azione sismica in termini massima accelerazione spettrale corrispondente all'intervallo di accelerazione costante dello spettro di risposta elastico con smorzamento del 5%, chiamato seismic action index, S_s , mentre nel caso della Classe DC3 non vi è alcun limite all'entità dell'azione sismica.

Nel caso di progettazione sismica condotta mediante un'analisi lineare con riduzione dell'azione sismica, la norma definisce il coefficiente di comportamento, q , come il prodotto di tre aliquote:

$$q = q_R q_S q_D \quad (1)$$

dove q_R è l'aliquota che tiene conto della sovrarresistenza dovuta alla redistribuzione plastica degli effetti dell'azione sismica nelle strutture ridondanti; q_S è l'aliquota che tiene conto della sovrarresistenza strutturale intrinseca; q_D è l'aliquota che tiene conto delle capacità di deformazione e dissipazione energetica. I valori delle diverse aliquote del coefficiente di comportamento dipendono dal tipo di sistema sismoresistente e dalla Classe di duttilità, ma vengono fornite delle indicazioni generali qui sintetizzate in tabella 2.

Con riferimento ai sistemi LWSF, il nuovo Eurocodice 8 (gennaio 2022) tratta questa tipologia al Paragrafo 11.14 (Design rules for lightweight steel systems) della Parte 2 (prEN 1998-1-2: Design of structures for earthquake resistance - Part 1-2: Rules for new buildings) e nell'Annesso G (Steel light weight structures). Le strutture del Paragrafo 11.14 e dell'Annesso G della EN 1998-1-2

sono illustrate rispettivamente nelle figure 5 e 6.

Tab. 2. Coefficienti di comportamento previsti dal nuovo Eurocodice 8 per le varie Classi di duttilità

Aliquota del coefficiente di comportamento	Classe di Duttilità		
	CD1	DC2	DC3
q_R	1 tranne nei casi in cui diversamente indicato		
q_S	1.5 tranne nei casi in cui è fornito un valore inferiore		
q_D	1	≥ 1	$\geq q_D$ fornito per la Classe DC2

<p>11.14 Design rules for lightweight steel systems</p> <p>11.14.1 General</p> <p>11.14.2 General verification rules for low-dissipative (DC1) and dissipative (DC2 and DC3) structural behaviour common to all lightweight steel systems</p> <p>11.14.3 Additional verification rules for dissipative (DC2 and DC3) structural behaviour common to all lightweight steel systems.</p> <p>11.14.4 Specific rules for dissipative (DC2 and DC3) strap braced walls</p> <p>11.14.5 Specific rules for dissipative (DC2 and DC3) shear walls with steel sheet sheathing</p> <p>11.14.6 Specific rules for dissipative (DC2 and DC3) shear walls with wood sheathing</p> <p>11.14.7 Specific rules for dissipative (DC2 and DC3) shear walls with gypsum sheathing</p>
--

Fig. 5 | Struttura del Paragrafo 11.14 dell'Eurocodice 8 - Parte 1.2 (gennaio 2022).

ANNEX F (normative)	
STEEL LIGHT WEIGHT STRUCTURES	
F.1.	Use of this Annex
F.2.	General
F.2.1.	Field of application
F.2.2.	Basis of design
F.3.	Strap braced walls
F.3.1.	Description
F.3.2.	Overstrength requirements
F.4.	Shear walls with steel sheet sheathing
F.4.1	Geometrical provisions and parts for dissipative DC2 and DC3 structural behaviour
F.4.2.	Overstrength provisions
F.4.3.	Effective strip method
F.5.	Shear walls with wood sheathing
F.5.1.	Geometrical and mechanical provisions for the components and parts for dissipative DC2 and DC3 structural behaviour
F.5.2.	Overstrength provisions
F.6	Shear walls with gypsum sheathing
F.6.1	Geometrical and mechanical provisions for the components and parts for dissipative DC2 and DC3 structural behaviour
F.6.2	Overstrength requirements for DC3

Fig. 6 | Struttura dell'Annesso G dell'Eurocodice 8 – Parte 1.2 (gennaio 2022).

5. Studi di riferimento utilizzati per lo sviluppo delle regole di progettazione dei sistemi LWSF

Oltre ad ispirarsi alla norma nordamericana AISI S400, molte delle regole presenti nel nuovo Eurocodice 8 per la progettazione sismica dei sistemi LWSF si riferiscono a diversi studi disponibili in letteratura. In particolare, i valori del coefficiente di comportamento per le strutture di Classe DC2 e DC3 derivano in larga parte da studi (Landolfo 2022, Fiorino et al 2021, Shakeel et al 2020, Shakeel et al 2019, Fiorino et al 2017) condotti seguendo la metodologia fornita dal documento FEMA P695 (Quantification of building seismic performance factors) (FEMA 2009), che si basa su un approccio iterativo che consente la definizione del coefficiente di comportamento e la verifica delle regole di gerarchia delle resistenze. In particolare, l'approccio proposto dalla FEMA P695 prevede la definizione di un insieme di archetipi progettati utilizzando inizialmente un valore di prova del coefficiente di comportamento. La risposta sismica degli archetipi è poi studiata mediante l'analisi statica non lineare e l'analisi dinamica non lineare incrementale e i risultati sono valutati in termini di probabilità di collasso. Se gli esiti della valutazione non sono accettabili, gli archetipi sono riprogettati con un valore inferiore

del coefficiente di comportamento e analizzati nuovamente. Il processo continua iterativamente fino a quando si giunge ad una probabilità di collasso ritenuta accettabile.

Valutazioni in accordo alla FEMA P695 sono state condotte dagli autori di questa memoria per le pareti controventate con piatti sottili (Landolfo et al 2022, Fiorino et al 2017) e per le pareti di taglio con pannelli in cartongesso (Landolfo et al 2022, Shakeel et al 2019) o legno (Landolfo et al 2022, Shakeel et al 2019). In questi studi è stato considerato un numero di archetipi variabile da 12 a 14, con destinazione d'uso residenziale o terziaria, altezze massime comprese tra 3 a 18 m e diversi livelli di pericolosità sismica.

Per le pareti di taglio con lamiere sottili in acciaio, gli studi di riferimento sono quelli condotti da Shamim e Rogers (2015), basati su regole di progetto conformi alla norma canadese, da Kechidi et al (2017), riferiti a regole progettuali europee esistenti, e dagli autori di questa memoria (Fiorino et al 2021), specificamente indirizzati allo sviluppo del nuovo Eurocodice 8.

6. Regole generali per i sistemi LWSF

Il nuovo Eurocodice 8 fornisce alcune regole generali, valide per tutti i sistemi LWSF e per qualsiasi Classe di duttilità, tese a garantire un comportamento sismico in linea con i risultati degli studi attualmente disponibili in letteratura. Tra queste compare la limitazione del massimo del rapporto di forma altezza-lunghezza della parete, che viene posto pari a 2 per limitare la tendenza a sviluppare un marcato comportamento flessionale tipico delle pareti con un rapporto di forma maggiore di 2, caratterizzato da una risposta sismica molto deformabile ed un'eccessiva inflessione dei montanti di corda. Specifiche sono fornite anche per i collegamenti effettuati con viti autoperforanti: nel caso di unione sottoposta ad azione tagliante è richiesta una sovreresistenza del meccanismo di rottura a taglio della vite, con coefficiente di sovreresistenza pari a 1,2, mentre non è consentito far ricorso alla resistenza all'estrazione della vite nel caso di azioni di trazione. Entrambe le regole sono derivate dalle prescrizioni dell'Eurocodice 3 – Parte 1.3 (CEN 2006a) e scongiurano un comportamento eccessivamente fragile del collegamento. Infine, così come prescritto per tutte le tipologie sismoresistenti in acciaio, anche per i sistemi LWSF viene indicato un limite per lo spostamento orizzontale di interpiano valutato allo stato limite di Danno significativo, fissato per questi sistemi pari a 1% dell'altezza di interpiano.

Nel caso di strutture LWSF ricadenti nella Classe di duttilità DC1, non sono fornite indicazioni specifiche sul coefficiente di comportamento da adottare, pertanto, possono considerarsi validi i valori forniti in Tabella 2, con $q = 1.5$. Sempre per la Classe DC1, il valore della massima accelerazione spettrale S_g è posto pari a $5,0 \text{ m/s}^2$.

7. Sistemi LWSF dissipativi

7.1 Regole per la progettazione degli elementi/meccanismi dissipativi/duttili e coefficienti di comportamento per la DC2 e la DC3

Per i sistemi LWSF il nuovo Eurocodice 8 non differenzia le regole per la progettazione degli elementi/meccanismi dissipativi/duttili per le Classi di duttilità DC2 e DC3. In particolare, per entrambe le

Classi, per le pareti di taglio la norma definisce requisiti geometrici e meccanici basati sulle limitazioni fornite dalla AISI S400 (AISI 2015), che prevedono limiti dimensionali e di resistenza per montanti, guide e lamiera in acciaio, e limiti dimensionali per pannelli e connessioni, come riassunti in tabella 3.

Per le pareti con piatti sottili di controventamento non sono previste limitazioni specifiche in termini di dimensioni e resistenze, ma si precisa che esse devono essere progettate considerando reagente la sola diagonale tesa. In particolare, la resistenza laterale di progetto della parete è calcolata in funzione della resistenza allo snervamento della sezione lorda dei piatti sottili di controventamento, $N_{pl,Rd}$, che deve essere non minore della resistenza di progetto a rottura della sezione netta, $N_{u,Rd}$. Questo requisito garantisce che il piatto di controventamento si snervi prima del collasso a trazione in corrispondenza della sezione trasversale indebolita dai fori necessari per collegare le estremità del piatto con gli altri elementi della parete. I valori di $N_{pl,Rd}$ e $N_{u,Rd}$ possono essere calcolati utilizzando le relazioni fornite dalla Parte 1.3 dell'Eurocodice 3 e nel paragrafo C4.2.12 della Circolare esplicativa alle NTC 2018 (tabella 4).

Per le pareti di taglio controventate con lamiera sottili in acciaio, la resistenza laterale di progetto, $R_{c,Rd}$, è calcolata a partire dalla resistenza a taglio dei fissaggi tra lamiera e profili montanti e/o guide, che sono attivati dalla formazione delle bande diagonali di trazione nelle lamiere. Tale resistenza deve essere non minore della resistenza a snervamento delle bande diagonali di trazione nelle lamiere, $R_{y,Rd}$. Questo requisito garantisce che i fissaggi tra lamiera e profili collasino prima dello snervamento delle bande diagonali di trazione che si formano nelle lamiere. I valori di $R_{c,Rd}$ e $R_{y,Rd}$ possono essere calcolati utilizzando il metodo della striscia efficace (Effective Strip Method: ESM) proposto da Yanagi e Yu (2014), secondo il quale la resistenza laterale della parete è funzione della porzione, chiamata larghezza efficace, w_{eff} , della striscia di lamiera che schematizza la banda diagonale tesa che si attiva a causa del carico laterale agente sulla parete. In particolare, Yanagi e Yu (2014) forniscono la procedura per la determinazione della larghezza efficace, in funzione dalle caratteristiche geometriche e meccaniche della parete, e le equazioni per il calcolo di $R_{c,Rd}$ (tabella 4). Queste ultime sono correlate alla resistenza a taglio dei fissaggi tra lamiera e profili montanti, e/o guide ($F_{b,Rd,ss}$, $F_{b,Rd,st}$, $F_{b,Rd,sts}$), determinate utilizzando le formulazioni presenti nella norma AISI S100 (AISI 2016). Il metodo proposto, calibrato da Yanagi e Yu sulla base di un gran numero di prove condotte negli Stati Uniti, è stato validato dagli autori di questa memoria considerando anche prove condotte in Canada (Fiorino et al 2021).

Per le pareti a taglio controventate con pannelli in legno o cartongesso, la resistenza laterale di progetto della parete, $R_{c,Rd}$, è calcolata a partire dalla resistenza a taglio dei fissaggi tra pannelli e profili, $F_{c,Rd}$, che in generale può essere ottenuta su base sperimentale e, nel caso di pannelli in legno, può essere valutata con le formulazioni fornite dall'Eurocodice 5 (CEN 2005) per i collegamenti delle strutture in legno (tabella 4). In particolare, la resistenza laterale della parete, $R_{c,Rd}$, può essere calcolata attraverso diversi metodi teorici disponibili in letteratura (Källsner e Girhammar 2009, McCutcheon 1985, Tuomi e McCutcheon 1978), che la mettono in relazione con la resistenza a taglio e

il numero dei fissaggi e, per alcune formulazioni, con parametri geometrici della parete. In particolare, il metodo del limite inferiore proposto da Källsner e Girhammar (2009) ipotizza che il trasferimento della forza orizzontale agente sulla parete, e dunque tra guida superiore o inferiore e pannelli, avvenga principalmente attraverso forze taglianti orizzontali agenti nei fissaggi tra guide e pannelli. Pertanto, la resistenza laterale della parete è funzione della resistenza a taglio del fissaggio tra guida e pannello e dal numero di fissaggi presenti lungo la guida (si veda l'Equazione (C) di tabella 4).

I valori dei coefficienti di comportamento, q , forniti dal nuovo Eurocodice 8 per i vari sistemi LWSF sono pari a 2,0 e 2,5, rispettivamente per la DC2 e la DC3, per tutti i sistemi ad eccezione delle pareti di taglio con pannelli in cartongesso, per le quali i valori di q sono ridotti a 1,7 e 2,0, rispettivamente per la DC2 e la DC3 (tabella 5). Tali valori sono in larga parte basati sui risultati di ricerche disponibili in letteratura, come illustrato nel precedente Paragrafo 5. Per la Classe di duttilità DC2 il valore della massima accelerazione spettrale S_g è posto pari a 7,5 m/s².

7.2 Requisiti di sovrarresistenza per gli elementi/meccanismi non dissipativi/fragili per la DC2

Nelle strutture di Classe DC2, i criteri di gerarchia delle resistenze vengono applicati utilizzando il coefficiente di sovrarresistenza dell'azione sismica, Ω , attraverso l'Equazione (2) valida per tutte le tipologie di sistemi LWSF (figura 7):

$$E_{Ed} = E_{Ed,G} + \Omega E_{Ed,E} \quad (2)$$

dove E_{Ed} è l'effetto totale agente sull'elemento non dissipativo; $E_{Ed,G}$ è l'effetto sull'elemento non dissipativo delle azioni non sismiche ottenuto considerando la combinazione di carico sismica; $E_{Ed,E}$ è l'effetto sull'elemento non dissipativo delle azioni sismiche di progetto; come ben noto il simbolo "+" è da intendersi come "combinato con". Il coefficiente Ω è posto dalla norma pari a 1,5 per tutti i sistemi LWSF, ad eccezione delle pareti di taglio con pannelli in cartongesso, per le quali esso è ridotto a 1,3 (tabella 5).

7.3 Requisiti di sovrarresistenza per gli elementi/meccanismi non dissipativi/fragili per la DC3

Nelle strutture di Classe DC3 i criteri di gerarchia delle resistenze sono differenziati per le varie tipologie di sistemi LWSF (figura 8). Per le pareti con piatti sottili di controventamento in acciaio i componenti non dissipativi devono essere progettati con una sovrarresistenza calcolata secondo l'Equazione (3).

$$E_{Ed} \geq E_{Ed,G} + 1,1 \varpi_{rm} E_{Nfy} \quad (3)$$

dove E_{Ed} è l'effetto totale agente sull'elemento non dissipativo; $E_{Ed,G}$ è l'effetto sull'elemento non dissipativo delle azioni non sismiche ottenuto considerando la combinazione di carico sismica; ϖ_{rm} è il coefficiente di sovrarresistenza del materiale, che tiene conto della variabilità della resistenza di snervamento dell'acciaio dei piatti di controventamento, ossia il rapporto tra la resistenza di snervamento attesa (resistenza di snervamento media) e quella nominale, e varia da 1,20 a 1,45 al decrescere del grado di resistenza dell'acciaio;

Tab. 3 | Limiti geometrici e meccanici per le pareti di taglio in DC2 C3

Componente	Limiti geometrici	Limiti meccanici
Per tutte le tipologie di pareti di taglio		
Montanti	$w_w \geq 90 \text{ mm}, w_f \geq 40 \text{ mm}, w_l \geq 10 \text{ mm}$	
Guide	$t_{sw} \geq 90 \text{ mm}, t_{sf} \geq 30 \text{ mm}$	
Pareti di taglio controventate con lamiere sottile in acciaio		
Rapporto di forma altezza-lunghezza della parete (*)	compreso tra 1,0 e 2,0	
Lamiera sottile	$0,4 \text{ mm} \leq t_p \leq 0,9 \text{ mm}$ $w \geq 300 \text{ mm}$	$f_y \leq 350 \text{ MPa}$
Montanti e guide	$t_f \geq 0,9 \text{ mm}; t_f \leq 1,35 \text{ mm} (*)$ $s_s \leq 600 \text{ mm}$	Per $t_f < 1,4 \text{ mm}$ $f_y = 220 \text{ MPa}$ Per $t_f \geq 1,4 \text{ mm}$ $f_y = 350 \text{ MPa}$
Viti	$4,2 \leq d \leq 4,8 \text{ mm}$ $50 \text{ mm} \leq s_{sc} \leq 150 \text{ mm}$ $s_{edge} \geq 13 \text{ mm}$	-
Pareti di taglio controventate con pannelli in legno		
Pannello in legno	OSB ($9 \text{ mm} \leq t_p \leq 11 \text{ mm}$) Compensato ($9,5 \text{ mm} \leq t_p \leq 12,5 \text{ mm}$) $w \geq 300 \text{ mm}$	-
Montanti e guide	$t_f \geq 1,1 \text{ mm}$ $s_s \leq 600 \text{ mm}$	Per $t_f < 1,4 \text{ mm}$ $f_y = 220 \text{ MPa}$ Per $t_f \geq 1,4 \text{ mm}$ $f_y = 350 \text{ MPa}$
Viti	Per $t_f < 1,4 \text{ mm}$ $d = 4,2 \text{ mm}, d_h \geq 7,2 \text{ mm}$ Per $t_f \geq 1,4 \text{ mm}$ $d = 4,8 \text{ mm}, d_h \geq 8,5 \text{ mm}$ $50 \text{ mm} \leq s_{sc} \leq 150 \text{ mm}$ $s_{edge} \geq 13 \text{ mm}$	-
Pareti di taglio controventate con pannelli in cartongesso		
Pannello in cartongesso	$t_p = 12,5 \text{ mm}$ $w \geq 300 \text{ mm}$	-
Montanti e guide	$t_f \geq 0,9 \text{ mm}$ $s_s \leq 600 \text{ mm}$	Per $t_f < 1,4 \text{ mm}$ $f_y = 220 \text{ MPa}$ Per $t_f \geq 1,4 \text{ mm}$ $f_y = 350 \text{ MPa}$
Viti	$d = 4,2 \text{ mm}, d_h \geq 7,2 \text{ mm}$ $50 \text{ mm} \leq s_{sc} \leq 150 \text{ mm}$ $s_{edge} \geq 12,5 \text{ mm}$	-
w_w altezza anima w_f larghezza ala w_l altezza irrigidimento di bordo t_p spessore lamiera o pannello t_f spessore montante e guida w larghezza lamiera o pannello d diametro nominale vite d_h diametro testa vite s_{sc} interasse viti sui bordi del pannello s_{edge} distanza viti dal bordo del pannello f_y tensione nominale di snervamento (*) per l'applicazione del Metodo ESM		

Tab. 4 | Regole per la progettazione degli elementi/meccanismi dissipativi/duttile per la DC2 e la DC3

Pareti con piatti sottili di controventamento in acciaio
Verifica sismica
$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd}; N_{pl,Rd} \geq N_{u,Rd}; N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \text{ (A)}; N_{u,Rd} = \frac{0.9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$
Pareti di taglio controventate con lamiere sottili in acciaio
$F_{Ed} \leq R_{c,Rd}; R_{c,Rd} \geq R_{y,Rd};$
$R_{c,Rd} = \left(\frac{w_{eff}}{2 s \sin \alpha} F_{b,Rd,st} + \frac{w_{eff}}{2 s \cos \alpha} F_{b,Rd,ss} + F_{b,Rd,sts} \right) \cos \alpha \text{ (B)}$
w_{eff} si veda Yanagi e Yu (2014)
$F_{b,Rd,st}, F_{b,Rd,ss}, F_{b,Rd,sts}$ si veda AISI S100 (AISII 2016)
Pareti di taglio controventate con pannelli in legno o cartongesso
$F_{Ed} \leq R_{c,Rd}$
$R_{c,Rd} = n_r F_{c,Rd} \text{ (C)}$ in accordo al metodo del limite inferiore proposto da Källsner e Girhammar (2009)
$F_{c,Rd} = \frac{k_{mod} F_{c,Rk}}{\gamma_M}$ per pannelli in legno, si veda EN 1995-1-1 (CEN 2005)
<p>N_{Ed} azione assiale di progetto agente nel piatto di controventamento nella combinazione di carico sismica</p> <p>$N_{pl,Rd}$ resistenza di progetto allo snervamento della sezione lorda del piatto di controventamento</p> <p>$N_{u,Rd}$ resistenza di progetto a rottura della sezione netta del piatto di controventamento</p> <p>A area della sezione lorda del piatto di controventamento</p> <p>A_{net} area della sezione netta del piatto di controventamento</p> <p>f_y tensione nominale di snervamento del piatto di controventamento</p> <p>f_u tensione nominale di rottura del piatto di controventamento</p> <p>γ_{M0} coefficiente di sicurezza per la resistenza delle sezioni di Classe 1, 2, 3 e 4</p> <p>γ_{M2} coefficiente di sicurezza per la resistenza nei riguardi della frattura delle sezioni tese (indebolite dai fori)</p> <p>F_{Ed} azione laterale di progetto agente sulla parete nella combinazione di carico sismica</p> <p>$R_{c,Rd}$ resistenza laterale di progetto della parete</p> <p>$R_{y,Rd}$ resistenza laterale di progetto della parete corrispondente alla resistenza a snervamento delle bande diagonali di trazione nella lamiera</p> <p>w_{eff} larghezza efficace della lamiera</p> <p>s spaziatura dei fissaggi tra lamiera e guide e/o montanti</p> <p>α angolo che la diagonale della lamiera forma con l'orizzontale</p> <p>$F_{b,Rd,st}$ resistenza di progetto a taglio del fissaggio tra lamiera e guida</p> <p>$F_{b,Rd,ss}$ resistenza di progetto a taglio del fissaggio tra lamiera e montante</p> <p>$F_{b,Rd,sts}$ resistenza di progetto a taglio del fissaggio tra lamiera, guida e montante</p> <p>$F_{c,Rd}$ resistenza di progetto a taglio del fissaggio tra pannello, guida o montante</p> <p>n_r numero di spazi tra i fissaggi lungo la guida superiore o inferiore</p> <p>$F_{c,Rk}$ resistenza caratteristica a taglio del fissaggio tra pannello in legno e guida o montante</p> <p>k_{mod} coefficiente correttivo che tiene conto dell'effetto sui parametri di resistenza della durata del carico e dell'umidità della struttura</p> <p>γ_M coefficienti di sicurezza per il materiale</p>

Tab. 5 | Coefficienti di comportamento e valori della massima accelerazione spettrale $S\delta$ per i sistemi LWSF

Sistema LWSF	DC1		DC2			DC3	
	q	$S\delta$ [m/s ²]	q	$S\delta$	Ω	q	$S\delta$
Pareti con piatti sottili di controventamento in acciaio	1,5	5,0	2,0	7,5	1,5	2,5	-
Pareti di taglio controventate con lamiera sottili in acciaio	1,5	5,0	2,0	7,5	1,5	2,5	-
Pareti di taglio controventate con pannelli in legno	1,5	5,0	2,0	7,5	1,5	2,5	-
Pareti di taglio controventate con pannelli in cartongesso	1,5	5,0	1,7	7,5	1,3	2,0	-

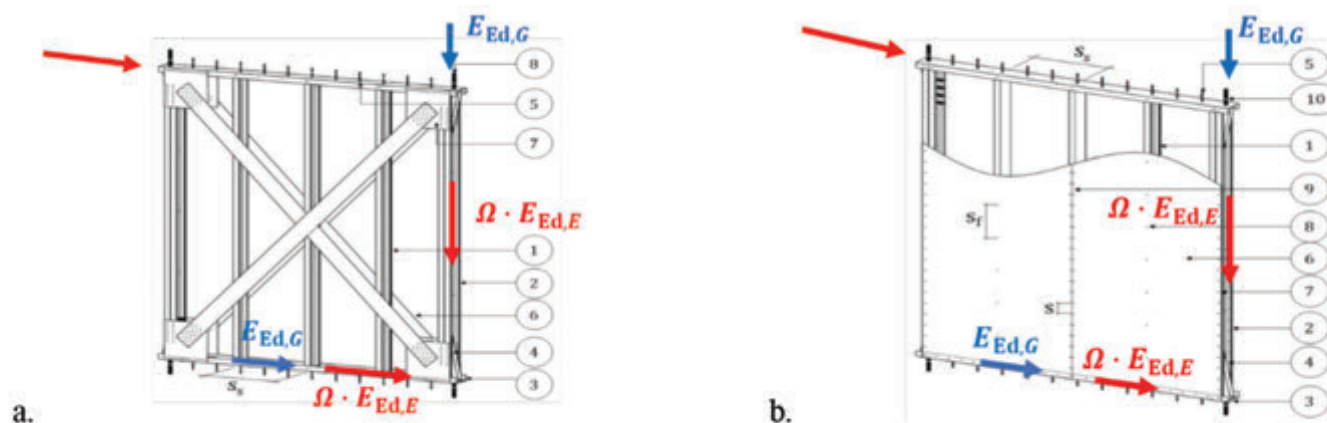


Fig. 7 | Applicazione della gerarchia delle resistenze per i sistemi LWSF di Classe DC2: a. Parete controventata con piatti sottili; b. Parete di taglio.

E_{Nfy} è l'effetto sull'elemento non dissipativo dell'azione prodotta dalla resistenza allo snervamento della sezione lorda dei piatti di controventamento, N_{fy} , calcolata considerando la tensione di snervamento nominale del materiale, f_y , ossia secondo l'Equazione (A) di Tabella 4, con $\gamma_{M0} = 1,0$; il coefficiente 1,1 tiene conto dell'incrudimento del materiale.

Per le pareti di taglio controventate con lamiera sottili in acciaio il requisito di sovrarresistenza è fornito con l'Equazione (4).

$$E_{Ed} \geq E_{Ed,G} + 1,4 E_{Rc,Rd} \quad (4)$$

dove $E_{Rc,Rd}$ è l'effetto sull'elemento non dissipativo dell'azione prodotta dalla resistenza di progetto dei fissaggi tra lamiera e profili montanti e/o guide che sono attivati dalla formazione delle bande diagonali di trazione nelle lamiera, $R_{c,Rd}$, calcolata secondo l'Equazione (B) di tabella 4.

Infine, per garantire la sovrarresistenza delle componenti non dissipative per le pareti di taglio controventate con pannelli in legno o cartongesso viene fornita l'Equazione (5).

$$E_{Ed} \geq E_{Ed,G} + 2 E_{Rc,Rd} \quad (5)$$

dove $E_{Rc,Rd}$ è l'effetto sull'elemento non dissipativo dell'azione prodotta dalla resistenza di progetto dei fissaggi tra pannello e profili, $R_{c,Rd}$, che può essere calcolata secondo l'Equazione (C) di

tabella 4.

8. Conclusioni

La memoria presenta una sintesi delle regole di progettazione sismica previste dalla nuova versione dell'Eurocodice 8 per le strutture in profili sottili formati a freddo in acciaio, anche note come sistemi lightweight steel framing (LWSF). Le regole sismiche implementate dalla norma si ispirano a quelle presenti nella "North American standard for seismic design of cold-formed steel structures" (AISI S400, AISI 2015) e si basano su diversi studi condotti seguendo la metodologia fornita dal documento FEMA P695 (Quantification of building seismic performance factors) (FEMA 2009), molti dei quali svolti presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II.

In particolare, la norma fornisce indicazioni per quattro diverse tipologie strutturali, pareti controventate con piatti sottili in acciaio disposti ad X, pareti di taglio controventate con lamiera sottili in acciaio, o con pannelli in legno o cartongesso, e tre diverse Classi di duttilità, bassa, media o alta dissipazione. Seguendo questo approccio, così come accade per i sistemi strutturali più comuni, anche per le strutture LWSF il nuovo Eurocodice 8 consente di scegliere il tipo di comportamento strutturale dissipativo per ciascuna tipologia codificata.

Pertanto, con il nuovo Eurocodice sarà finalmente colmato quel divario normativo che ha fortemente limitato l'utilizzo dei sistemi LWSF nei paesi europei a rischio sismico.

Bibliografia

1. ASCE. 2016. SEI/ASCE, ASCE 7-16 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
2. AISI. 2015. AISI S400-15 North American Standard for Seismic Design of Cold formed Steel Structural Systems, American Iron and Steel Institute (AISI).
3. AISI. 2016. AISI S100-16 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, American Iron and Steel Institute (AISI).
4. CEN. 2004. EN 1998-1 Eurocode 8: Design of Structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels.
5. CEN 2005. EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures Part 1-1: general - Common rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels.
6. CEN. 2006a. EN 1993-1-3 Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-3: General rules-Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, European Committee for Standardization, Brussels.
7. CEN. 2006b. EN 1993-1-5 Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-5: Plated structural elements, European Committee for Standardization, Brussels.
8. FEMA. 2009. FEMA P695: Quantification of Building Seismic Performance Factors, Washington, DC, USA.
9. Fiorino, L., Shakeel, S., Macillo, V., Landolfo, R. 2017. Behaviour factor (q) evaluation the CFS braced structures according to FEMA P695, J. Constr. Steel Res. 138 (2017) 324–339. doi:10.1016/j.jcsr.2017.07.014.
10. Fiorino, L., Campiche, A., Shakeel, S., Landolfo, R. 2021. Seismic design rules for lightweight steel shear walls with steel sheet sheathing in the 2nd-generation Eurocodes. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 187, Article no. 106951. doi: 10.1016/j.jcsr.2021.106951
11. Källsner, B., Girhammar U.A. 2009. Plastic models for analysis of fully anchored light-frame timber shear walls, Eng. Struct. 31 (2009) 2171–2181. doi:10.1016/j.engstruct.2009.03.023.
12. Kechidi, S., Bourahla, N., Castro, J.M. 2017. Seismic design procedure for cold-formed steel sheathed shear wall frames: Proposal and evaluation, J. Constr. Steel Res. 128 (2017) 219–232. doi:10.1016/j.jcsr.2016.08.018.
13. Landolfo, R. 2019. Lightweight steel framed systems in seismic areas: Current achievements and future challenges, Thin-Walled Struct. 140 (2019) 114–131. doi:10.1016/j.tws.2019.03.039.
14. Landolfo, R. 2020. Sistemi costruttivi leggeri stratificati in acciaio: una soluzione “robusta” per le applicazioni in zone sismiche. Costruzioni metalliche, Rivista Bimestrale dei Tecnici dell’Acciaio, ACS-ACAI, Milano, N.1, pp. 51–69.
15. Landolfo, R., Shakeel, S., Fiorino, L. 2022. Lightweight steel systems: Proposal and validation of seismic design rules for second generation of Eurocode 8. Thin-Walled Structures. Vol. 172, Article no. 108826. doi.org: 10.1016/j.tws.2021.108826
16. McCutcheon, W.J. 1985. Racking Deformations in Wood Shear Walls, J. Struct. Eng. 111 (1985) 257–269. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:2(257).
17. Ministero delle infrastrutture e dei trasporti. 2018. D.M. 17 gennaio 2018 (G.U. 20 febbraio 2018) Norme tecniche per le costruzioni.
18. Ministero delle infrastrutture e dei trasporti. 2019. Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.
19. NRCC. 2015. National Building Code of Canada, National Research Council of Canada (NRCC), Ottawa, ON, Canada.
20. Shakeel, S., Landolfo, R., Fiorino, L. 2019. Behaviour factor evaluation of CFS shear walls with gypsum board sheathing according to FEMA P695 for Eurocodes, Thin-Walled Struct. 141 (2019) 194–207. doi:10.1016/j.tws.2019.04.017.
21. Shakeel, S., Fiorino, L., Landolfo, R. 2020. Behavior factor evaluation of CFS wood sheathed shear walls according to FEMA P695 for Eurocodes, Eng. Struct. 221 (2020) 111042. doi:10.1016/j.engstruct.2020.111042.
22. Shamim, I., Rogers, C.A. 2015, Numerical evaluation: AISI S400 steel-sheathed CFS framed shear wall seismic design method, Thin-Walled Struct. 95 (2015) 48–59. doi:10.1016/j.tws.2015.06.011.
23. Tuomi R.L., McCutcheon, W.J. 1978. Racking Strength of Light-Frame Nailed Walls, J. Struct. Div. ASCE. 104 (1978) 1131–1140.
24. Vitale, P., Spagnuolo, A., Lubritto, C., Arena, U. 2018. Environmental performances of residential buildings with a structure in cold formed steel or reinforced concrete, J. Clean. Prod. 189 (2018) 839–852. doi:10.1016/j.jclepro.2018.04.088.
25. Yanagi, N., Yu, C. 2014. Effective Strip Method for the Design of Cold-Formed Steel Framed Shear Wall with Steel Sheet Sheathing, J. Struct. Eng. 140 (2014) 04013101. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000870.



Raffaele Landolfo

Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni presso l'Università degli Studi di Napoli "Federico II", dove ha ricoperto il ruolo di Direttore del Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura. Tra le diverse attività di insegnamento, è titolare dei corsi di "Teoria e Progetto delle strutture in Acciaio" presso la Scuola di Ingegneria e "Laboratorio di Tecnica delle Costruzioni" nella Scuola di Architettura. In ambito scientifico, ha partecipato a numerosi progetti di ricerca nazionali ed internazionali nel campo della progettazione sismica delle strutture in acciaio, delle costruzioni leggere, del progetto dei collegamenti e della sostenibilità, in qualità sia di responsabile scientifico che di responsabile di unità. La produzione scientifica annovera oltre 500 memorie, molte delle quali pubblicate su riviste nazionali ed internazionali, e diversi libri. In ambito normativo, è stato Presidente dell'European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), dove attualmente riveste il ruolo di Chairman del Technical Committee n.13 - Seismic Design. Inoltre è Convenor del CEN/TC250/SC8/WG2 sulle "Strutture in acciaio e composite" ed è stato recentemente eletto Presidente della Commissione Ingegneria Strutturale dell'UNI.



Luigi Fiorino

Professore associato di Tecnica delle Costruzioni presso il Dipartimento di strutture per l'ingegneria e l'architettura dell'Università di Napoli Federico II. È membro di commissioni nazionali e internazionali per lo sviluppo e l'implementazione di normative tecniche, ovvero la commissione del Comitato europeo di normazione CEN/TC250/SC9/WG2 (Progettazione di strutture in alluminio - nuovi tipi di connessioni) e la commissione dell'Ente nazionale italiano di unificazione UNI/CT021/SC09 (Strutture in alluminio). La sua attività di ricerca si concentra principalmente sulle seguenti tematiche: sistemi costruttivi basati sull'utilizzo di profili metallici formati a freddo; strutture di acciaio; strutture in lega di alluminio; componenti non strutturali; ingegneria sismica. È rientrato nella classifica del 2% dei migliori ricercatori mondiali per l'anno 2019 redatta da Ioannidis JPA, Boyack KW, Baas J (2020). Impegnato in molti progetti di ricerca nazionali e internazionali con finanziamenti pubblici e di industriali (tra cui Saint-Gobain, Knauf, Hilti, Manni), è autore di oltre 200 articoli scientifici, molti dei quali pubblicati su riviste nazionali e internazionali. del 2% dei migliori ricercatori mondiali per l'anno 2019 redatta da Ioannidis JPA, Boyack KW, Baas J (2020). Impegnato in molti progetti di ricerca nazionali e internazionali con finanziamenti pubblici e di industriali (tra cui Saint-Gobain, Knauf, Hilti, Manni), è autore di oltre 200 articoli scientifici, molti dei quali pubblicati su riviste nazionali e internazionali

Optimization study of High Bay Warehouses by using high strength steels

Studio di ottimizzazione di magazzini autoportanti verticali mediante l'utilizzo di acciai ad alta resistenza sulla base di prove sperimentali, calcolazioni analitiche e numeriche

Eng. Christian Dago Ngodji, Eng. Mathieu Gauchey, Eng. Géraldine Wain | CRM Group, Belgium
Eng. PhD Francesco Morelli, Eng. PhD Agnese Natali | Università di Pisa, Italy
Eng. Francesco Lippi | S.I.T.A.

Online shopping has grown significantly in recent years. This high demand is the result of both the covid-19 pandemic and the change in consumer behavior. Nowadays, everything can be bought online, from beauty items to meal kits. To assure this surging demand and fast distribution, retailers are looking for high storage capacity solutions. High Bay Warehouses (HBW) structures are the ideal solution to provide large storage volumes and to improve logistic related to products transport and storage. HBW are lightweight structures mainly made from steel cold-formed components as uprights, bracings and pallet beams. The use of high strength steels could push further the optimization of these profiles to achieve weight and CO₂ emissions reductions and cost savings while keeping similar performances.

Gli acquisti online sono cresciuti in modo significativo negli ultimi anni. Questa elevata domanda è risultato sia della pandemia di covid-19 sia del cambiamento nel comportamento dei consumatori. Attualmente, si può acquistare tutto online, dagli articoli di bellezza al cibo. Per assicurare questa crescente domanda e una rapida distribuzione, i rivenditori cercano soluzioni ad alta capacità di stoccaggio. Le strutture High Bay Warehouses (HBW) sono la soluzione ideale per lo stoccaggio di grandi volumi e per migliorare la logistica e la movimentazione delle merci. Le HBW sono strutture leggere realizzate principalmente con componenti in acciaio con processi di lavorazioni a freddo come montanti, controventi e travi per pallet. L'uso di acciai ad alta resistenza può ottimizzare l'uso di questi profili e, garantendo prestazioni simili, può portare a riduzioni in peso degli elementi, minori emissioni di CO₂ e minor costo.

1. Introduction

High Bay Warehouses (HBW) are high density storage solutions to maximize space. There are lightweight structures mainly made from steel cold-formed components. Dimensions of such structures can reach a 45 m height, with various dimensions for length and width depending on site size. The pallets are stored on horizontal beams which are linked to frames with fast or bolted connections. The HBW can be single, double or multiple depth depending on the number of pallets that can be stored in the bay depth.

The objective of this paper is the optimization of the HBW by using high strength steels to achieve weight reduction, cost savings and to decrease CO₂ emissions while keeping similar performances than the reference solution made in common steel, here in S350GD. In this study, the use of structural galvanized high strength steels, especially the HyPer® grades from ArcelorMittal, has been used to maximize the design.

2. Reference case

The reference case was defined based on a market and statistical analysis. Data were gathered from four main international companies producing HBW for logistical solutions in order to represent the most common solutions for Europe, the United States, Mexico, India and Saudi Arabi. A total of 63 projects were analyzed. This market overview permitted to identify the common dimensions, materials and typologies used to determine the main characteristics of the reference case structure, as presented on figure 1 and figure 2:

- Double-depth storage system
- 14 levels in height
- 32 bays (down-aisle direction)
- Number of pallets to be stored: 17 920
- 35 x 86,2 x 36,7 m (Height x length x depth)
- Reference steel grade : S350GD +Z/+ZM EN10346

The pallets are stored into bays and depending on the number of pallets that can be stored in the bay depth, the warehouse can be single, double or multiple depth. A bay is the space defined by upper and lower pallet beams which support pallets and by uprights on the sides. In the studied layout, the warehouse was double depth and two pallets could be stored along the width of the beam as sketched on figure 2. In this project, C-section profiles were used for the pallet beams. If automatic storage and retrieval

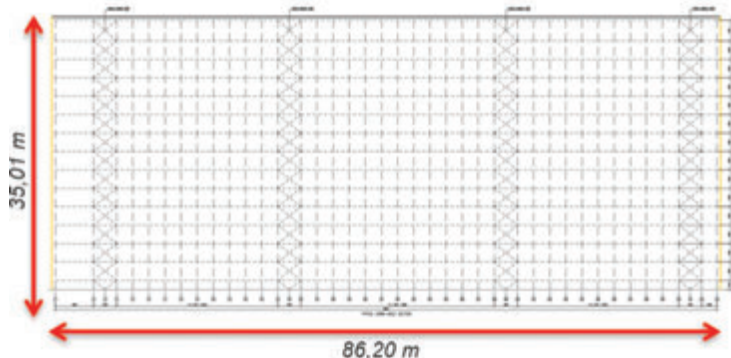


Fig. 1 | Global view in the down-aisle direction

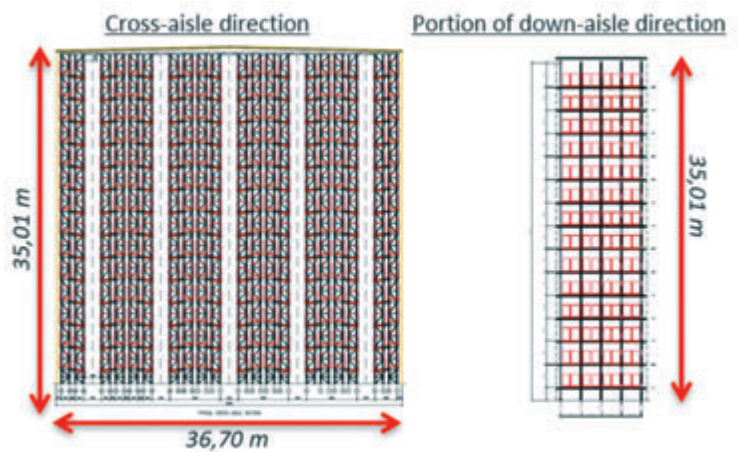


Fig. 2 | On the left: Front view in the cross-aisle direction; on the right: Partial view in the down-aisle direction

(S/R) machines are used, the design has to fulfill requirements from the S/R device specifications which are mainly linked to deflection criteria under Service Limit State (SLS) to ensure proper use.

These horizontal pallet beams are connected to upright frames which are composed of uprights and bracings. Connections between pallet beams and uprights can be either made with a hooked joint connection type (recommended option if bay height has to be often modified during lifetime of the structure) or by a bolted connection (bay height is more seen as fixed). In the study, bolted connections were used to link beams to uprights.

C-section profiles were defined for the bracings and a typical open section profile was used for the upright. The section was the same for all columns in the warehouse but there was a thickness variation along the height. Columns close to the floor ground are thicker than the ones near the roof because they support higher loads. In cross-aisle direction, adjacent upright frames are linked together with HEA profiles to ensure the global behavior of the structure. Vertical bracing towers can also be used in the long-aisle or down-aisle direction to stiffen the structure and to reduce deformations due to wind loads. These vertical bracing towers were considered in the current warehouse study.

For clad-rack warehouses, the structure of the building itself is made of racking systems on which lateral and roof panels are fixed to close the building. In this configuration, steel structures are designed to withstand external loads as wind and snow. The assumption of clad-rack warehouse was done for this project.

3. Standards & Materials

Main standards used for the design of the HBW were based on Eurocodes and norms linked to storage systems as listed below:

- EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for building
- EN 1993-1-3: Eurocode 1: Action on structures – Part 1-3 : General action- Snow loads
- EN 1991-1-4 : Eurocode 1 : Action on structures – Part 1-4 : General actions : wind loads
- EN 1993-1-5 : Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements
- prEN 15512 :2018 – Steel static storage systems – Adjustable

- pallet racking systems – Principles for structural design
- FEM 9.831: 1995 – Calculation principles of storage and retrieval machines

Structural steels					
Mechanical properties in rolling direction					
	Norm	YS (MPa)	TS (MPa)	A ₈₀ % mini	TS/YS
S350GD	EN 10346	> 350	> 420	> 16	-
S390GD	EN 10346	> 390	> 460	> 16	-
S420GD	EN 10346	> 420	> 480	> 15	-
S420GD-HyPer®	ArcelorMittal	> 420	480 – 620	> 15	> 1.1
S450GD	EN10346	> 450	> 510	> 14	-
S450GD-HyPer®	ArcelorMittal	> 450	510 – 650	> 15	> 1.1
S550GD	EN10346	> 550	> 560	-	-
S550GD-HyPer®	ArcelorMittal	> 550	600 – 760	> 13	> 1.05
S700GD-HyPer®	ArcelorMittal	>700	750 - 910	>10	> 1.05

Available dimensions	Thickness: 0.70 to 6 mm (Lower thickness on request)	Width: up to 1680 mm
----------------------	---	----------------------

S420GD HyPer® and S450GD HvPer® EN 1993-1-1: $\frac{f_u}{f_y} \geq 1.1$ & $A_{prop} \geq 15\%$	S550GD HyPer® and S700GD HvPer® EN 1993-1-12: $\frac{f_u}{f_y} \geq 1.05$ & $A_{prop} \geq 10\%$
--	--

Tab. 1 | Mechanical properties of HyPer®grades from ArcelorMittal

Eurocodes were mainly used to define loads, to check steel sections and connections resistance. Global structural analyses were performed with SAP2000 Software, whose structural checks are also based on Eurocodes.

EN 15512 was used as reference to design the warehouse but also

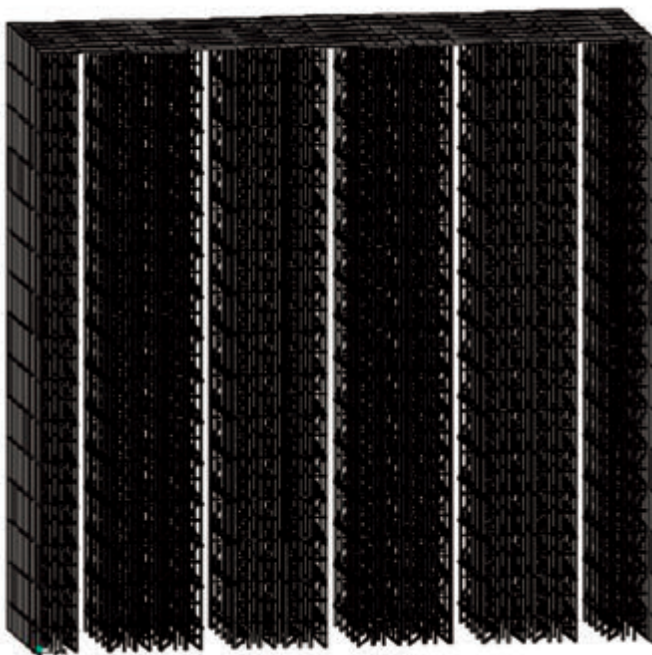


Fig. 3 | Central portion of the HBW modelled with SAP2000 software

as a complement to the Eurocodes for steel sections checks, to carry out experimental testing and to check material requirements. HyPer® grades from ArcelorMittal satisfy the requirements specified in this standard (e.g.: fy/fu ratio, ductility requirements).

FEM standard was important to check maximum allowable values linked to S/R machines specifications, which focus mainly on the deflection criteria. For the reference case, S350GD +Z/+ZM was chosen as the reference steel grade while S550GD +Z/+ZM, especially the S550GD HyPer® developed by ArcelorMittal according EN 10346, was identified for the optimization. Mechanical properties of HyPer® steel grades are presented in the table 1.

HyPer® grades families from ArcelorMittal are high performance grades fulfilling the ductility requirements from Eurocode EN - 1993-1-1, EN 1993-1-3 and EN1993-1-12 and the ones from EN15512. The upper limit of the tensile strength of the HyPer® families make easier the punching and piercing and these high strength structural steels are also suitable for cold roll-forming, main process used to manufacture components of warehouses.

4. Design and optimization

The layout of each warehouse is based on a complete overview of the needs, requirements and constraints of the customer. In this project, the warehouse configuration was defined according to the market research done to analyze a representative structure of the current market.

Firstly, the layout of the reference solution in S350GD was chosen based on a market analysis as described in the previous section. The structural design of the reference case study was carried out based on analytical checks and structural calculations done with SAP2000 software to fulfill requirements from standards mentioned previously. Once the reference design was fully verified, the first phase of the material optimization has started. The combination of high strength steel, S550GD, and thickness reduction has led to the optimized design and its verification has followed the same methodology than the reference case. To get more detailed values for mechanical properties and connections stiffness, an experimental test campaign for the optimized case (S550GD) as recommended by the EN15512 standards was defined. The outputs of the tests were used to refine the structural analyses carried out for the reference and optimized cases. Experimental data were used instead of theoretical values in the second iteration of the structural check which lead to new design for both cases (S350GD and S550GD). Tests results were also used to correlate numerical models. The numerical modeling had several aims, including the validation of the FE results and the correlation with experimental measurements. These proven FE models were then used to assess performances of non-tested components and could also be employed for further optimization.

4.1. Structural design of the reference solution (S350GD)

A central portion of the HBW was modelled with the software SAP2000 in collaboration with an Italian design office, S.I.T.A SRL, to check the global structural behavior of the warehouse. The SAP model represented a total of five alleys and four bays modelled with beams elements while shell elements were used to

S350GD + Z				
Element	Section	From [m]	To [m]	Weight [kg/m]
UPRIGHTS - SIDE	C140x140x30#6,0	0,000	11,710	25,15
	C140x140x30#4,0	11,710	23,710	17,33
	C140x140x30#3,0	23,710	35,000	13,19
UPRIGHTS - CENTRAL	C140x140x30#4,0	0,000	11,710	17,33
	C140x140x30#3,0	11,710	23,710	13,19
	C140x140x30#2,5	23,710	35,000	11,07
BRACINGS - SIDE	C80x80x15#2,0			4,43
	C80x50x15#1,5			2,4
BRACINGS - CENTRAL	C80x50x15#1,5			2,4
	C80x50x15#1,5			2,4
PALLET BEAMS	C120x60x25#2,5			5,47
BACKS	HEA140			24,7
ROOF BEAM	HEA200			42,3

Fig. 4 | Overview of the components for the reference case in S350GD

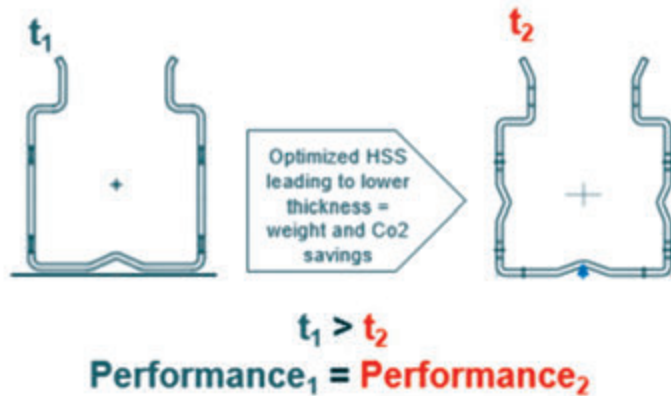


Fig. 5 | Optimization of upright profile by using high strength steel

represent lateral and roof panels. Vertical bracing towers, located in the long aisle direction, were not modelled but relevant boundary conditions were applied to consider it.

Dead, pallet, wind and snow loads were applied on the structure as well as an overall sway imperfection of 1/200. A total of five load combinations were studied to check ULS criteria according EN11512:2018 while two load combinations were studied to assess deflection criteria according to FEM 9.831 for the global structure under external loads and for the pallet beams under working loads. Static non-linear analyses with P-delta effect were run to assess the global behavior of the warehouse.

The section resistance of the components (upright, bracing, beam) as the bolted connections were checked analytically according Eurocode standards and EN15512.

The first reference design, made in S350GD, obtained from analytical calculations and modelling carried out with SAP2000 software is shown on figure 4. Main components and their dimensions are

listed. As mentioned previously, each component was determined with a single cross section but thickness variation was done to fulfill requirements and to optimize the system. Total weight of the reference HBW modeled in SAP2000 (central portion) was around 141.6 tons, leading to a weight per unit area of 459.7 kg/m²

4.2. Optimization with the use of HSS (S550GD)

The goal of the project was to optimize HBW elements by using high strength steels (HSS). This material optimization is relevant if the design criteria is linked to a resistance problem (ULS) rather than a deflection one (SLS) where the use of HSS is not very helpful at first sight. An analysis of the structural behavior of the main components of the warehouse was done to highlight the potential failure modes and leading parameters in order to understand where the use of HSS could be relevant for optimization.

The upright is mainly subjected to axial compression and bending loads. Thin cold-formed sections under compression and bending forces are critical to buckling (local, distortional or global buckling depending on the length and slenderness ratio). Parameters that can improve components resistance under these loads are the effective cross-section area and the slenderness ratio. The use of HSS can have an interest to optimize these profiles by keeping a similar geometry and by reducing thickness while ensuring that similar mechanical properties listed above are maintained.

For the bracings, connected to the uprights with bolted connection, main loads are axial compression and tension forces. As for the upright, attention should be paid to buckling. A similar conclusion to that obtained for the upright can be drawn for the bracings: use of HSS for optimization is relevant.

Under the assumption of low seismic zone, only the vertical loads of pallets were considered for the horizontal beams. The beam is mainly subjected to bending and main parameters to consider here are the effective modulus of the cross section. In this scenario, the thickness reduction and use of HSS is not sufficient to optimize the beam.

Following these considerations, the optimization by reducing thickness and using HSS, S550GD HyPer®, was only made for the uprights and bracings. For the pallet beam, a modification of the geometry of the cross section would have been required.

For the upright optimization, a slight modification was made to the profile geometry to keep similar mechanical properties and to prevent potential local buckling phenomena that could be higher with the thickness reduction. Lateral stiffeners were added to the sides of the profiles for the S550GD solution as sketched on figure 5 while keeping all other dimensions (except the thickness which is the optimization parameter with the use of HSS). For the bracings, only thickness reduction was applied to the C-section profiles.

Same structural checks were carried out for the S550GD solution as the ones done for the reference case in S350GD:

a. Global assessment of the structure behavior with SAP2000 Software

b. Analytical checks of elements sections and connections according EN 15512 and Eurocodes

Results of the optimization based on analytical calculations and modelling with SAP2000 software are summarized on figure 6 where components are listed. A comparison can be done with the

S550GD HyPer +ZM				
Element	Section	From [m]	To [m]	Weight [kg/m]
UPRIGHTS - SIDE	C140x140x30#3,8	0,000	6,300	16,83
	C140x140x30#3,5	6,300	15,900	15,58
	C140x140x30#3,0	15,900	25,500	13,45
	C140x140x30#2,5	25,500	35,000	11,29
UPRIGHTS - CENTRAL	C140x140x30#3,0	0,000	6,300	13,45
	C140x140x30#2,5	6,300	35,000	11,29
BRACINGS - SIDE	C80x80x15#2,0	0,000	7,500	4,43
	C80x80x15#2,0	7,500	35,000	3,36
	C80x50x15#0,8			1,31
BRACINGS - CENTRAL	C80x50x15#1,2	0,000	5,100	1,94
	C80x50x15#1,0	5,100	12,300	1,63
	C80x50x15#0,8	12,300	35,000	1,31
	C80x50x15#0,8			1,31
PALLET BEAMS	C120x60x25#2,5			5,47
BACKS	HEA140			24,7
ROOF BEAM	HEA200			42,3

Fig. 6 | Overview of the components after optimization in S550GD

figure 4 listed for the reference case in S350GD. Total weight of the optimized HBW modeled in SAP2000 (central portion) was around 122.2 tons, corresponding to a surface weight of 396.1 kg/m². Following this optimization, a weight reduction of 13,6% was achieved. 65% of the weight reduction was obtained with the optimization of upright while the remaining 35% came from the bracing thickness reduction.

4.3. Experimental testing for optimized case (S550GD)

Experimental tests and their configurations were carried out according EN 15512 specifications. The selected tests were those that characterize properties of the upright and bracings as there

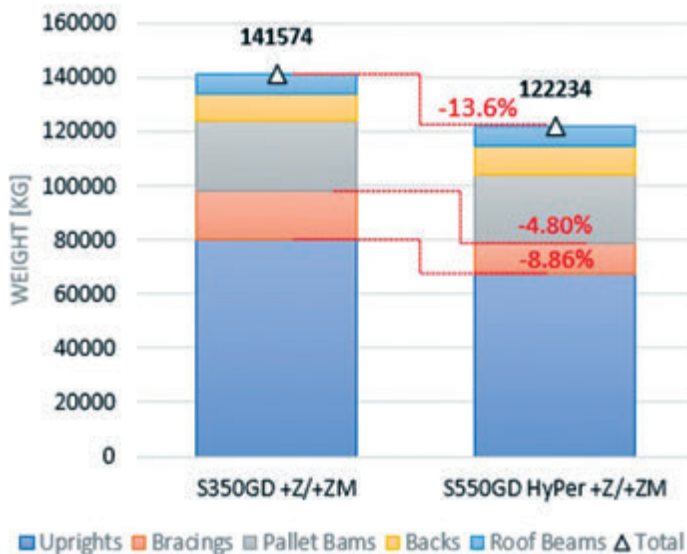


Fig. 7 | Optimization results of the first optimization iteration

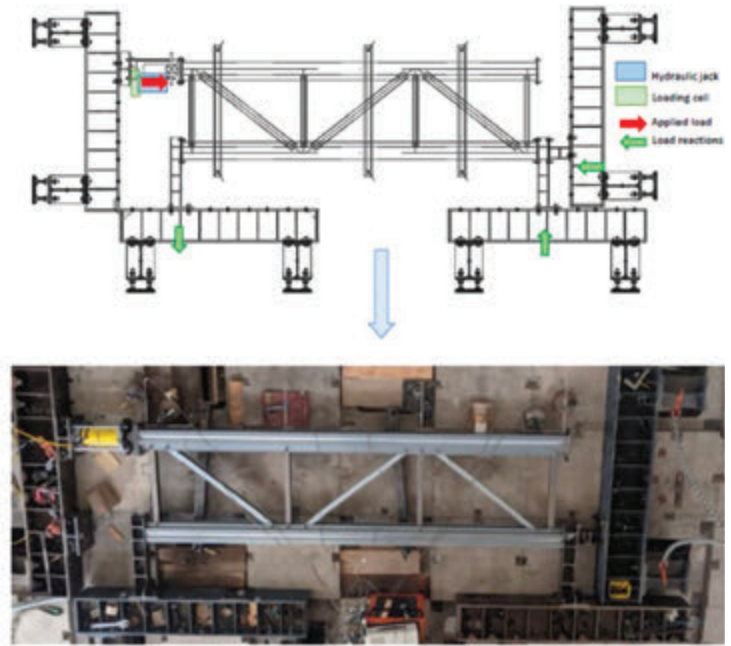


Fig. 8 | Frame shear stiffness test

were the two components under optimization. For each type of test, at least three tests were carried out to check repeatability of results. All the tests were carried out in collaboration and in the laboratories of the University of Pisa, in Italy.

Several compressions tests were carried out to highlight the different failure modes of the upright and sub-assemblies, here the upright frame. The first one was made on a stub column, where the height of the column was equal to 420 mm. This test was carried out to show the influence of the local buckling on the compressive strength resistance of the upright. This test is also usually done to highlight the influence of perforations on the strength but in this project, there was no perforation along the height except at the specific location to assure the connections with bracing and pallet beams. Each test was equipped with load cells, strain gauges and displacements sensors to record data that were used to calibrate numerical models. The second compression test was done on a longer column, with a height of 1200 mm to showcase the influence of distortional buckling.

The third and last compression test was done with upright frames, which is the structure obtained by assembling two uprights with bracings. This test was carried out to assess the compressive strength of the frame. Three different heights for the frame were tested to consider the different buckling modes that could appear (L1 = 2610 mm, L2 = 3810 mm, L3 = 5010 mm).

The fourth test was a bending test on the upright section to evaluate the bending resistance around its main axis. The last test was the frame shear stiffness test to determine the transverse shear stiffness and looseness of the upright frame. The height of the tested frame was 4.5m as pictured on figure 8. Results and recorded measurements were used to calibrate numerical models but were also useful to refine the global structural design made with SAP2000 software. The value of shear stiffness obtained experimentally can be integrated in SAP2000 calculations to represent the stiffness of the bracing to upright connection. This

was done by assessing an area reduction factor for the braces.

4.4. Numerical correlation and post-processing

Numerical models were created for each of the five test configurations with several aims: firstly, to create model to represent each experimental test set-up and to compare and to correlate results with experimental outputs, secondly these numerical models were used to assess properties of non-tested components (e.g.: to evaluate performances of the same upright profile but with a higher thickness) and finally to post-process results. Numerical modelling was done with Abaqus software. Each model was built with shell elements whose dimensions were decided following a mesh convergence study to obtain the best compromise between calculations times and results accuracy. Depending on the experimental test, two types of analyses were launched. The first one was a linear buckling analysis to identify eigen modes of the component followed by a static-analysis where relevant eigenmodes identified in the previous step were added as an initial imperfection.

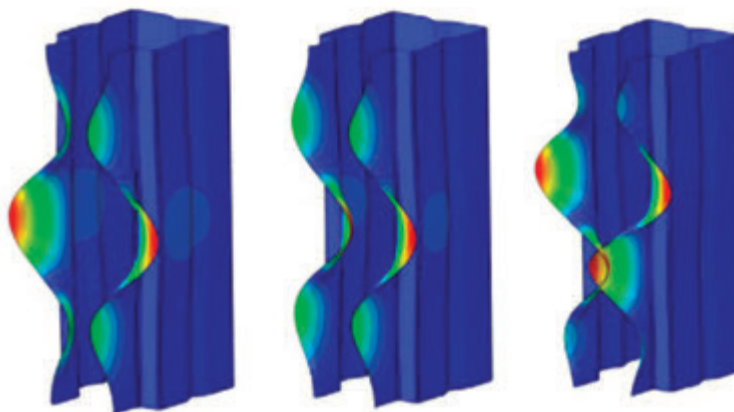


Fig. 9 | Linear buckling analysis

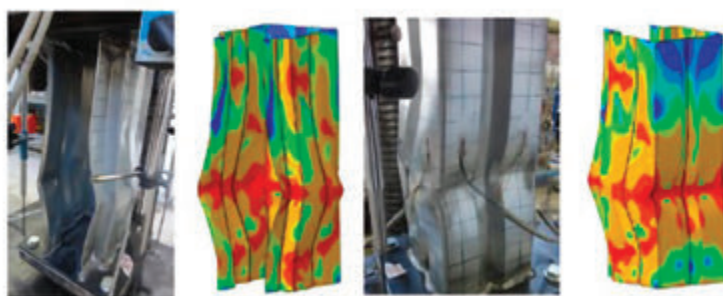


Fig. 10 | Correlation between experimental and numerical results

The eigenmode that best reflects the deformed shape of the sample observed with experimental testing was selected to be used as an initial imperfection in the static analysis. The eigenvalues were also determined based on the experimental measurements. For materials, depending on the analysis, a linear or elasto-plastic material curves were used. When plastic deformation appeared, elasto-plastic material was preferred to linear material. Tensile tests were carried to characterize materials according ISO 6892-1. Boundary conditions were also calibrated to get closer to

the experimental results by, for example, using spring to better represent the stiffness of the connection. For each test, numerical results were validated based on experimental outputs as the deformed shape, the displacement-force curves, the maximum loads and other data recorded during experimental testing with measurement devices (strain gauges, displacement sensors, loads cells, ...).

Once all numerical models were calibrated, post processing based on numerical and experimental results were carried out. Data were post-processed according EN15512 recommendations to consider the actual thickness of component and yield strength, when specified in the test description.

For the compression test on stub column and upright, the maximum load obtained from tests allowed to assess the effective cross section area due to local buckling and due to distortional buckling, respectively. In both cases, a value of 1022 mm² was calculated. The test output for the compression test on upright frame was the reducing factor χ , parameter used to assess the buckling resistance for steel members according to Eurocode. A value of 0,695 was obtained. The effective section modulus was derived from the bending test on upright and no reduction was observed. For the shear stiffness tests on upright frame, no adjustments were brought to the experimental results as specified in the EN 15512 shear test description. From this test, initial stiffness corresponding to looseness of the upright frame as defined in EN 15512 and the transverse shear stiffness can be assessed with the initial and second slope of the force-displacement curves. The looseness can be modeled as an initial imperfection (out of plumb) or by defining a spring constant. This option, determination of spring constant, can also be used for the transverse shear stiffness or, the second option, is to assess a reduced area factor for the bracing. The second option was used in the project. A value of 4,3 kN/mm was obtained and a reduction factor of 0.085 was assessed with local FE modeling.

4.5. Update of reference and optimized global models

Global structural models created with SAP2000 software were updated with values obtained from the post-processing of experimental and numerical results. Due to these modifications, calculations were launched again to check the structural design of the warehouses, for both the reference (S350GD) and optimized (S550GD) cases. Due to the introduction of the area reduction factor for the bracing, the SLS checks were no longer valid for the horizontal deflection due the wind loads for both reference and optimized cases. Consequently, bracing thicknesses were increased until SLS checks were fulfilled and ULS checks were then carried out to complete the global structural checks. For the updated reference structure, a total weight for the part modeled in SAP2000 of 153,9 t was obtained (499.5kg/m²) while for the optimized one, the weight was around 138,7 t (450.8kg/m²).

Updated dimensions and repartition of elements along the cross-aisle direction are shown on figure 11 for the reference case and on figure 12 for the optimized one. A total weight reduction of 9.9% was achieved when passing from S350GD to S550GD for bracings and uprights optimizations. For bracing, only a reduction of thickness was done while for upright, the thickness reduction

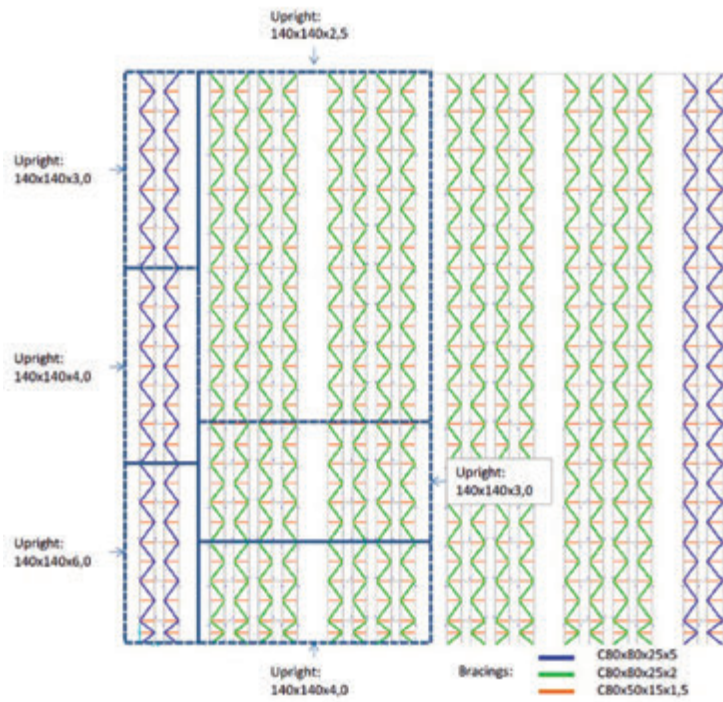


Fig. 11 | Overview of the elements after final check for the reference case

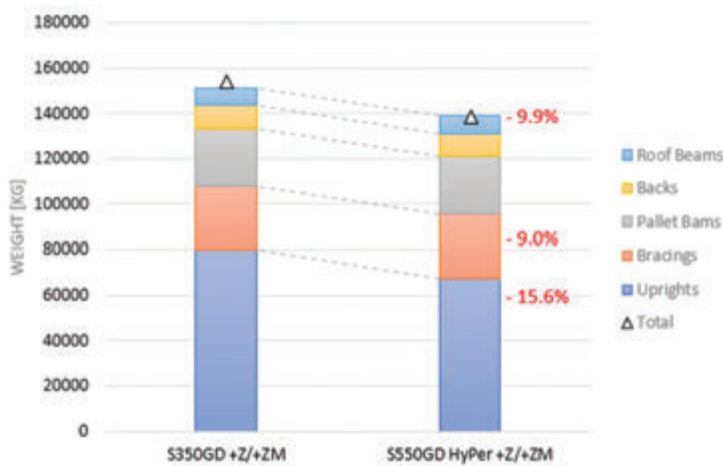


Fig. 13 | Weight reduction of final optimization

was accompanied by a section modification with the addition of lateral stiffeners to keep similar mechanical properties. The main weight reduction came from the upright representing around 81,7% of the weight reduction. Due to the area reduction factor derived from the shear stiffness test on upright frame for the bracings, the SLS checks were not satisfied and resulted in an increase of thickness for the bracing, both for the reference and optimized cases, which consequently limits the room for optimization for the bracing elements. The use of HSS is of interest to optimize weight and CO₂ emissions reductions as cost savings. For the CO₂ emissions, a first assessment was simply achieved by referring to the weight optimization, leading to a 9,9% reduction of CO₂. For the cost savings, due to the current variation of steel prices, different configurations were assessed as indicated in figure 14. The costs savings were estimated between 5,2% and 8,1% depending on the level of price, level 1 referring to the lowest steel price.

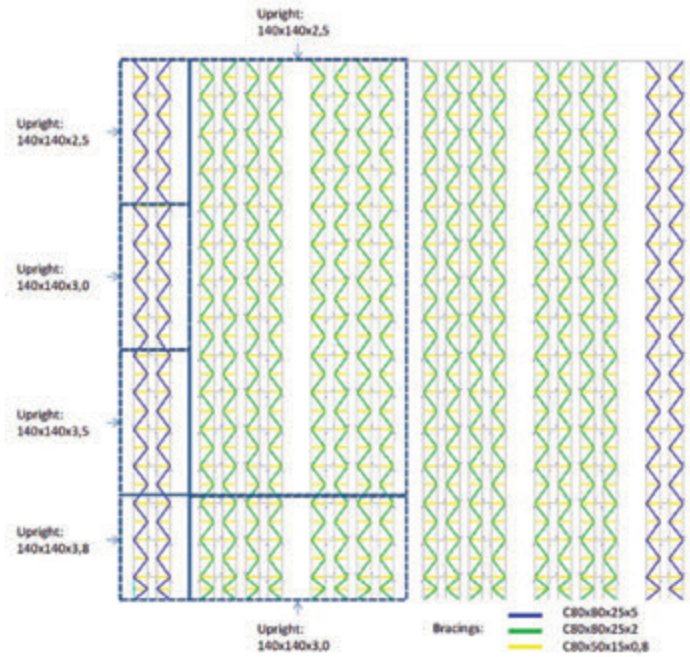


Fig. 12 | Overview of the elements after final check for the optimized case

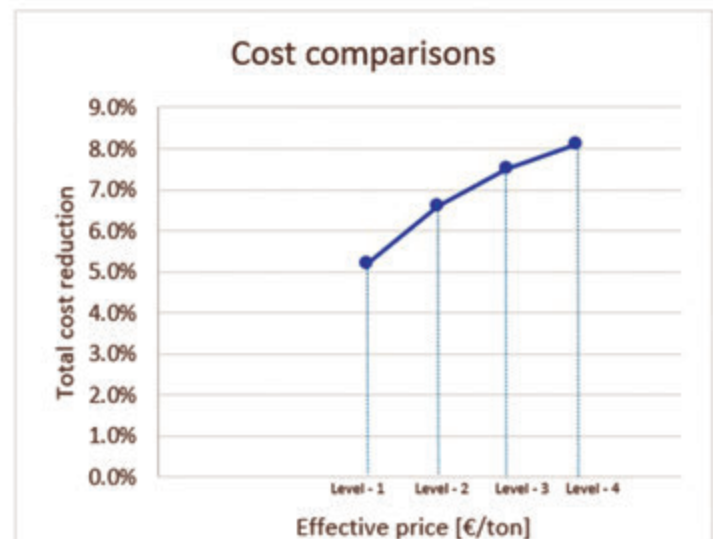


Fig. 14 | Cost savings with the use of HSS for the final optimization

5. Conclusion

The use of high strength steels can be of interest to optimize high bay warehouse structures and leads to weight and CO₂ emissions reductions as cost savings. This study was focused on upright and bracing optimization with mainly a reduction of thickness. Further improvements could be carried out by modifying the geometry of these elements for further optimization but also by applying this methodology for the other components non considered in this project as the pallet beam and the beam end connector. It is also important to remind that the use of high strength steel is highly beneficial when the design criteria is linked to a resistance problem (ULS) than a deformability one (SLS). In the last case, the use of HSS should be accompanied with a modification of the geometry to achieve a full optimization.

References

- CEN, EN 1993-1-1, “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”, 2005
- CEN, EN 1993-1-3, “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting”, 2006
- CEN/TC 250, “prEN 1993-1-14:2020: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis”, 2020
- Dubina D. Ungureanu V., (2002), “Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members”, Thin-Walled Structures 40 (2002) 239-262
- CEN, EN 1991-1-4, “Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4 : General actions – Wind actions“, 2010
- CEN/TC 344, “prEN 15512:Steel static storage systems – Adjustable pallet racking systems – Principles for structural design”, 2018
- CEN, EN 1993-1-5, “Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements”, 2006
- F.E.M 9.831, “Bases de calcul pour les transtockeurs – Tolérances, déformations et cotes de dégagement dans les installations de stockage lourd avec transtockeur“, 1995
-



Christian DAGO NGODJI

Graduated from high school in Cameroon in 2012, he first started studying Physics at the University of Yaounde I (Cameroon) before arriving in Belgium in 2013. He pursued his studies in Belgium first in Civil Architectural Engineering, then in Civil Mechanical Engineering where he got a bachelor's degree and obtained his Master's degree in Civil Engineering from the University of Liège. Since the beginning of his carrier, Christian is deeply involved in projects related to static and dynamic structural analyses of massive and slender solutions as industrial chimneys, bridges, warehouses and offshore foundations. At CRM Group, Christian daily works on design solutions based on static and dynamic analytical calculations (ULS, SLS, FLS, Buckling, ...). Besides fulfilling standards requirements, he also performs finite element analyses on multiple software (SCIA, RFEM, Abaqus).



Mathieu GAUCHEY

He graduated from ISMANS (Le Mans, France) in 2014 with a degree in mechanical engineering with a specialization in finite element modelling. First, Mathieu spent several years in the 'Department of Numerical Methods' in a well-known aeronautical company to develop finite element calculation methods on engine parts and support design offices. Then, he joined the team of finite element experts at CRM Group to work on civil engineering applications and mechanical engineering challenges. Mathieu has extensive experience and expertise on Abaqus software and structural optimizations.



Géraldine Wain

She has a Master's degree in mechanical engineering from the University of Louvain-la-Neuve, Belgium. She joined CRM Group early as a Research Engineer to perform structural analysis. Quickly, she developed strong skills in project management and understanding of customer needs. Nowadays, she's Program Leader in the operational department "Innovative Design & Assembly Solutions". She leads a team to successfully complete research activities for customers in the energy sector (as High Voltage Transmission Poles, Fixed and Floating Offshore Wind Turbines foundations, Wave & Tidal technologies) and the logistic market (as racking systems and high bay warehouses).



Francesco Morelli

Francesco Morelli is an Assistant Professor at the Department of Civil and Industrial Engineering of the University of Pisa, in the field of Building Technique. He has more than 10 years of experience in participating to RFCS project focused mainly on the development of new steel and hybrid steel and reinforced concrete structural system, with a high specialization in earthquake engineering aspects. His research interests include the development of seismic protection systems, of new structural systems and the assessment and retrofit of existing ones. Francesco Morelli is also the Technical Supervisor of the "Official Laboratory for experimental tests on construction material" of the University of Pisa. This laboratory is very versatile, as it has several universal testing machines and both free spaces with strong floors and contrasting walls that can be adapted to test from small to big specimens (up to 5 meters high, 2.5 meters large and 3 meters long) under different loading conditions. In this lab, many experimental campaigns for RFCS projects and several research collaborations have been conducted.



Agnese Natali

She is a post-doc at the Department of Civil and Industrial Engineering of the University of Pisa, with a strong experience on the design and the seismic assessment of steel structures. She is participating to 3 RFCS research project on steel and hybrid steel-concrete structures, and she was part of the research group led by Francesco Morelli and the Prof. Walter Salvatore who coordinated the research project STEEWAR, which is dedicated to the development of design rules for Automated Rack Supported Warehouses.



Francesco Lippi

He is a Civil Engineer, PhD, Head of Technical Office at S.I.T.A. - Civil Engineering Society, and has more than 15 year experience in the design of industrial and civil buildings with an extensive practice on steel construction in seismic areas. He collaborated with main industrial partners in the design and maintenance of High Bay Steel Warehouses and Racks both in Italy and Worldwide. He is author of scientific papers, published both in international journals and in conferences, and technical manuals for Italian editors.

Un'architettura innovativa che si integra tra i palazzi storici della città di Udine: Palazzo Eden

An innovative architecture that integrates among the historic buildings of the city of Udine: Palazzo Eden

Ing. Andrea Biasi* | Ferroberica, gruppo Alfa Acciai, Brescia

Ing. Federico Iori | ASF srl, Trento

Ing. Stefano Costantini & Arch. Lorenzo Paroni | Archest, Palmanova



In questo articolo si illustra il lavoro di progettazione e realizzazione del Palazzo Eden a Udine, che ha sfruttato parzialmente le strutture di un edificio esistente, con particolare riferimento alla nuova struttura di facciata.

This article illustrates the design and construction work of Palazzo Eden in Udine, which partially reused the structures of an existing building, with particular reference to the new facade structure.

Introduzione

Palazzo Eden è il nuovo cuore del centro storico di Udine: affacciato su Piazza della Libertà, sui Giardini Morpurgo e su Piazza Duomo, regala una prospettiva ineguagliabile per vivere il centro di Udine (figura 1).

Palazzo Eden riveste un importante ruolo nel processo di rinnovamento del centro storico della città in rispettoso equilibrio con la sua storia.

Il palazzo rappresenta infatti un'architettura innovativa ed efficiente che dialoga con le presistenze di alto valore storico della città. Un nuovo modo di abitare esclusivo e riservato. Un progetto accurato che utilizza le tecnologie più

*Corresponding author. Email: andrea.biasi.italy@gmail.com



Fig. 1 | Vista aerea del centro di Udine



Fig. 2 | Palazzo Eden – Vista d'angolo

innovative ed efficienti: un modo di abitare esclusivo e riservato che accoglie svelando una nuova idea di estetica, di comfort e di agiatezza (figura 2).

La tipologia costruttiva di Palazzo Eden è improntata alla massima

efficienza e al più rigoroso rispetto dei principi di ecosostenibilità, studiato per garantire il più elevato comfort abitativo. Il processo di rigenerazione infatti, con il recupero di buona parte della struttura esistente e con sapienti scelte progettuali, ha consentito



1922-1958: **cinema EDEN** (arch. Provino Valle)

Fig. 3 | Immagine dei Cinema Eden di Provino Valle



Fig. 4 | Dettaglio dell'angolo dell'edificio che affaccia su piazza libertà

la riduzione dell'impatto ambientale.

Un edificio a gradoni dalle linee scolpite e dal carattere contemporaneo, in cui le superfici opache e le trasparenze sono sapientemente accostate e intervallate da giardini pensili e cortili privati.

Le vetrate giocano un ruolo importante nell'integrazione del nuovo edificio tra i palazzi storici che si riflettono da ogni angolazione sulle specchiature.

Il progetto: la ristrutturazione

L'intervento sull'edificio denominato "ex-Upim", che ha portato alla realizzazione di Palazzo Eden, è tecnicamente un intervento di ristrutturazione edilizia anche se si configura in realtà come un progetto di vera e propria rigenerazione. La struttura è inserita in un contesto molto sensibile, si confronta con le maggiori preesistenze architettoniche del centro cittadino e con un paesaggio urbano e un patrimonio

identitario ben consolidati.

La scelta di un intervento di ristrutturazione e non di nuova costruzione deriva principalmente dalla volontà di contenere l'impatto delle lavorazioni di cantiere.

In luogo dell'attuale preesistenza c'era il Cinema Eden (figura 3), edificio in stile liberty progettato dall'architetto udinese Provino Valle e realizzato nel medesimo periodo nel quale si portavano a compimento i lavori di costruzione del Municipio di Udine, opera dell'architetto Raimondo D'Aronco del 1910. L'edificio oggi oggetto di ristrutturazione ha poi sostituito la pregevole opera liberty nei primi anni Sessanta.

Tale edificio è collocato a Udine in pieno centro storico, di fronte alla sede degli uffici comunali; posto alla testa di un isolato, è delimitato su tre lati dalle strade del centro cittadino; al piano terra, su questi tre lati presenta un portico. L'edificio esistente è chiuso quasi completamente attorno a una piccola corte e fronteggia il palazzo del Municipio per circa 52 m, mentre il lato corto misura circa 43 m. Esso, consta di due livelli interrati e cinque fuori terra, l'ultimo dei quali arretrato rispetto ai fronti perimetrali. I piani -1, terra e +1 ospitavano dei grandi magazzini; i restanti piani invece erano destinati a residenza e uffici. Un secondo piano interrato era destinato a deposito.

Conformemente alle Norme di Piano ("volume utile", non superiore a quello esistente e "altezza dell'edificio" inferiore a quella del prospiciente Palazzo D'Aronco), nel rinnovato edificio dal secondo piano in su si conteranno 31 unità residenziali; i piani "commerciali" manterranno la stessa destinazione d'uso e il



Fig. 5 | Immagine della corte interna dell'edificio

secondo interrato sarà adibito ad autorimessa.

Dell'edificio esistente rimane la sola struttura in cemento armato. Su di essa saranno impostati due piani in sopraelevazione: la volumetria necessaria sarà reperita dalla parziale demolizione delle ali sud-est e sud-ovest dell'edificio; tali demolizioni, e seguente sopraelevazione, permetteranno una nuova articolazione dei volumi e maggior apertura della corte interna con seguente miglior esposizione, aerazione e soleggiamento, e visuale sulla piazza del Duomo. Le unità residenziali avranno quasi tutte un doppio affaccio: su strada e sulla corte interna aperta verso sud.

I nuovi piani terra e primo sono una sorta di "ordine gigante", per meglio rapportarsi con il porticato del Municipio di fronte: le vetrine del piano terra sono ribattute al piano superiore e, delimitate dai pilastri da cui sporgono come una serie di teche vetrate, si presentano come una successione sospesa di volumi.

I piani superiori invece sono evidenziati da spessi marcapiani tra i quali si muovono, quasi a scorrere, i pannelli in grande formato di gres e le aperture di differenti dimensioni. Un sistema di logge, chiudibili con vetri impacchettabili, caratterizza i piani secondo e

terzo. Gli altri piani residenziali, arretrati rispetto al filo di facciata su strada, sono invece caratterizzati da ampie terrazze.

Oltre alla riconfigurazione del volume esistente, l'altra mossa principale del progetto è quella che porta ad una nuova definizione dell'angolo a nord, per meglio raffrontarsi con la torre del Palazzo Comunale, ricercando con essa l'antico dialogo dei tempi del Cinema Eden e realizzando nuovamente "la porta di ingresso" al centro storico; al tempo stesso troverà compiutezza il prospetto su piazza Libertà.

Per la definizione del nuovo angolo a completamento del fronte su Piazza della Libertà si è ritenuto necessario sviluppare un elemento che riproponesse in primis le proporzioni della torre d'angolo del Palazzo Municipale, recuperando anche un certo sviluppo in altezza, pur non superandola: al di sopra del "basamento" commerciale, in corrispondenza della piega in angolo, i marcapiani del secondo livello salgono verso l'alto per riunirsi in una sorta di portale. Dal quarto piano, il portale si libera in una sorta di quinta o doppio fronte, un elemento non strutturale che non segue l'arretramento dei piani superiori e che è da questi del tutto distaccato.



Fig. 6 | Sezione e prospetto della soluzione d'angolo della facciata

La soluzione di un angolo smaterializzato che si manifesta come un doppio fronte, apparendo poi come una sorta di articolazione o snodo tra la parte in sopraelevazione e quella esistente, risulta necessaria nel rispetto normativo delle distanze dagli edifici circostanti.

L'angolo, il punto di vista più importante dell'edificio, diventa il fronte principale (figura 4).

Si restituisce all'angolo la propria indipendenza nel confronto con

la torretta del palazzo del Municipio; la soluzione d'angolo diventa elemento di spicco e di maggior caratterizzazione dell'edificio e, con il Municipio, ricostruisce una serie di rapporti e proporzioni urbane perdute con la demolizione del vecchio cinema.

Un aspetto fondamentale del progetto è rappresentato dalla scelta dei materiali e dei colori: il risultato che si vuole ottenere è quello di un edificio che ben si armonizzi con l'intorno presentando i toni caldi delle cortine edilizie dei centri storici, differenziandosi



Fig. 7 | Vettrine laterali dell'edificio

dal palazzo municipale, unico nel contesto per il tipo di materiale e cromia.

Data la complessità dell'intervento e la delicatezza del contesto, e di un vincolo di tutela indiretta che grava su parte dell'intervento, durante la fase di ideazione e di progettazione sono stati numerosi gli incontri tra i progettisti e la "Soprintendenza", un dialogo che ha portato all'elaborazione condivisa del progetto di rigenerazione dell'edificio.

Il sistema di facciata

Il team di progettazione ha elaborato il dettaglio delle chiusure trasparenti di Palazzo Eden, individuando nella facciata a montanti e traversi Schuco FWS 50.SG il sistema più adatto alla realizzazione (figure 9 e 11).

Questa soluzione offre infatti un'elevata flessibilità progettuale per la costruzione di facciate e coperture vetrate ad elevato isolamento termico con un'estetica snella e la possibilità di integrare superfici apribili come porte e finestre.

La soluzione ha inoltre permesso di accostare elementi vetrati sporgenti con rivestimenti ciechi dei pilastri e di integrare all'interno delle facciate dei vasistas motorizzati con funzione di evacuatore fumo, nascosti all'occhio di chi ammira l'edificio grazie al tamponamento complanare in lamiera in tinta (figura 8). Nello specifico di tratta di elementi di ventilazione Schüco AWS VV (Ventilation Vent) sono elementi apribili non trasparenti, a base larga, che possono essere realizzati con altezza anche minima. La ripartizione, da noi definita, delle facciate al piano primo, ha dato l'allineamento per la creazione delle vetrine al piano terra, nelle quali si ripete l'alternanza vuoto-pieno enfatizzato maggiormente dal ritmo dato dalla boiserie del colonnato e dal controsoffitto del porticato.

L'involucro esterno viene realizzato tramite elementi a secco per assicurare la più elevata performance energetica. Particolare cura ed attenzione viene dedicata all'adeguamento sismico realizzato tramite tecnologie di ultima generazione.

I profili di alluminio a taglio termico sono stati trattati con un bagno di ossidazione di tonalità marrone per meglio riflettere lo stile materico dell'edificio. I lamierati di rivestimento delle colonne in cemento armato, nella stessa finitura, distinguono i piani a uso commerciale dai piani superiori a uso abitativo.

I vetrocamera basso emissivi sono caratterizzati da lastre extrachiaro per una maggiore luminosità degli ambienti interni e la massima visibilità degli spazi commerciali che si affacciano sulle vie del centro al piano terra.

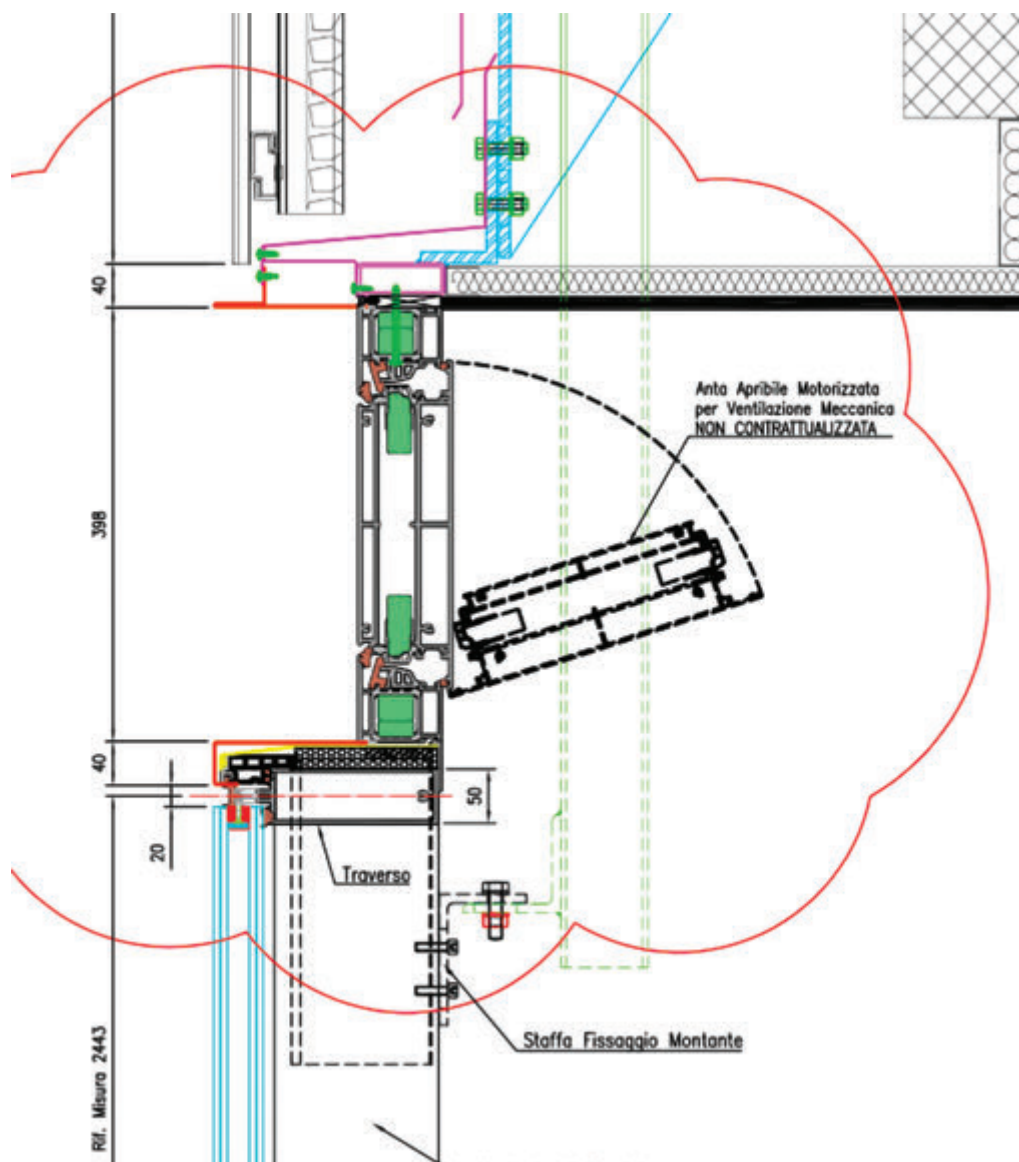


Fig. 8 | Dettaglio dell'evacuatore fumo integrato nel rivestimento opaco superiore della vetrina

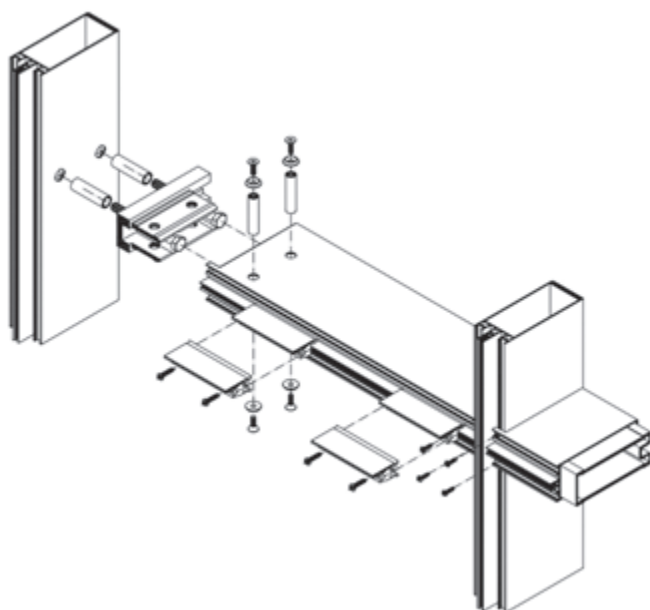


Fig. 9 | Giunzione montante traverso Schuco FW 50 SG

Nella facciata ad angolo le trasparenze si alternano a vetrocamera retro-laccati, celano le solette e sottolineano la divisione dei piani. Negli ultimi due piani della facciata principale, viene evidenziato il gioco vuoto-pieno in cui è stato studiato un sistema di facciata privo di tamponamento in cui emergono i soli montanti, creando continuità con i piani sottostanti. Si crea così l'affaccio rivolto al Castello di Udine per le terrazze degli appartamenti privati degli ultimi piani. Le logge vengono schermate da pannelli filtranti per preservare la privacy mentre le terrazze vengono predisposte per sistemi di protezione e controllo dell'irraggiamento.

Particolare attenzione è stata dedicata al verde. La suggestiva corte interna trattata a verde al secondo piano, prosegue idealmente il fascino dei giardini Morpurgo e dalle terrazze che vanno a formare veri e propri giardini pensili.

Progettazione, costruzione e posa delle facciate vetrate sono state realizzate secondo le normative vigenti per ottenere il massimo risultato in termini di isolamento termico e acustico in linea con gli elevati standard di innovazione ed efficienza energetica, oltre che comfort abitativo, che caratterizzano l'intero edificio.

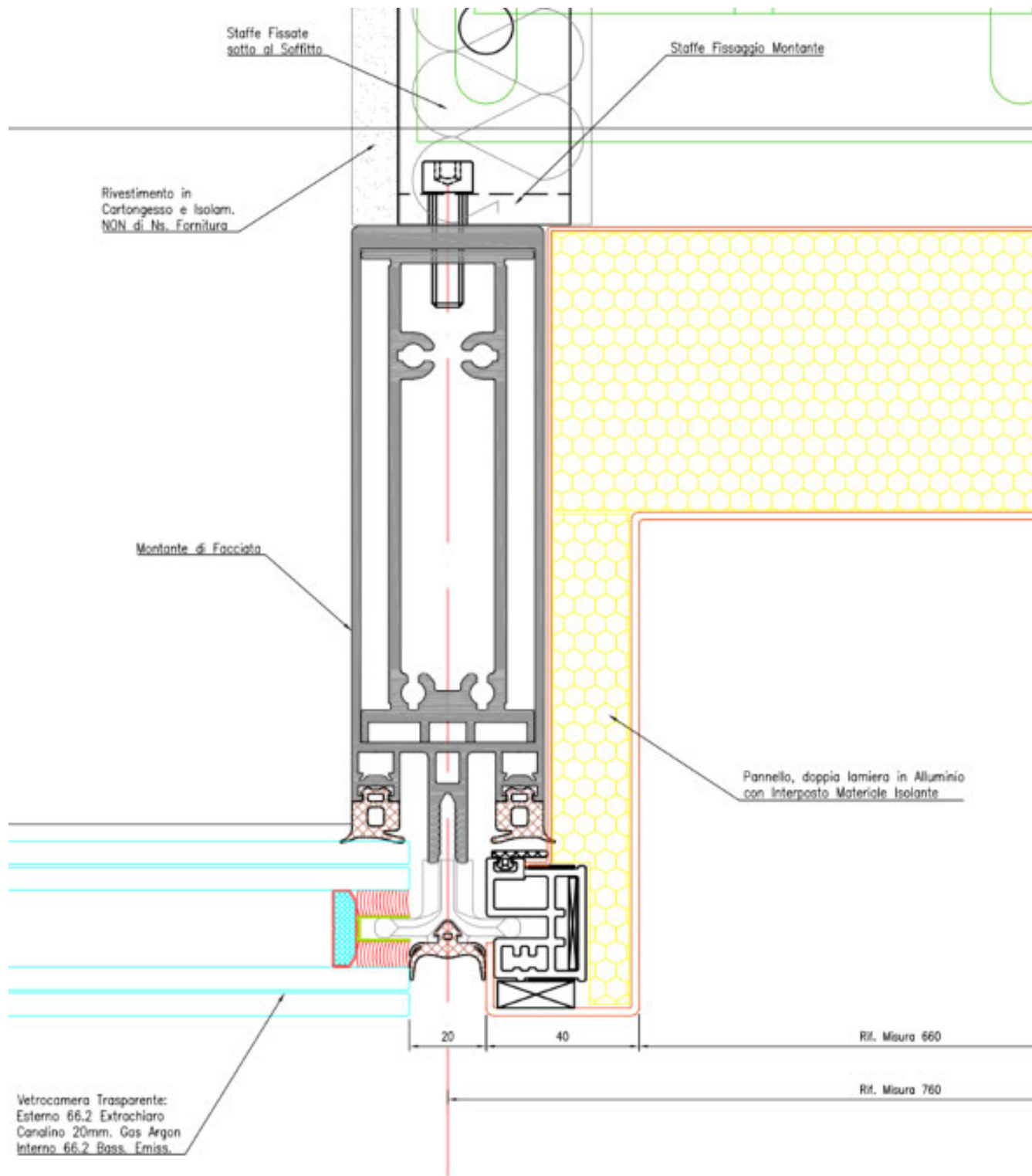


Fig. 10 | Dettaglio del montante laterale della vetrina con rivestimento opaco laterale in lamiera

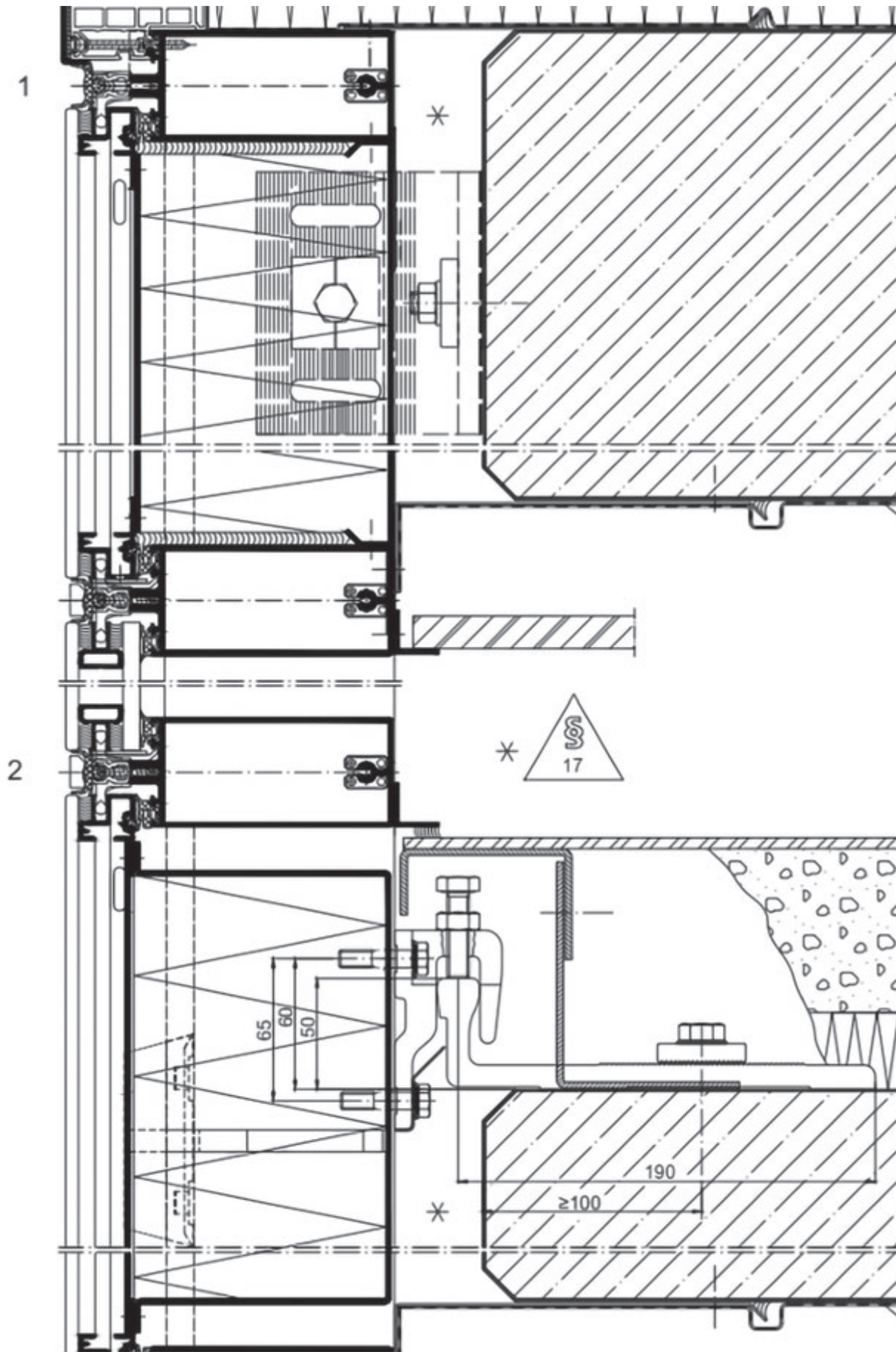


Fig. 11 | Dettaglio attacco facciata alla struttura dell'edificio



Credits

Committente:	IRIDE (Immobiliare Rizzani de Eccher)
Main Contractor:	Rizzani de Eccher S.p.A.
Architetti:	arch. Gaetano De Napoli, arch. Daniele Bazzaro, arch. Annamaria Cocco (Archest)
Design Team:	ing. Stefano Costantini, arch. Lorenzo Paroni, arch. Tommaso laiza, arch. Francesco Tessaro, arch. Simone Rossi (Archest)
Facade Engineering:	Modula Group con ASF- Archest
Data completamento:	06/2019
Superficie Lorda facciate:	8208 mq



Andrea Biasi

Ad oggi in forza alla società Ferroberica del Gruppo Alfa Acciai. Ventennale esperienza nella progettazione di facciate e rivestimenti (società ASF del Gruppo Archest); ventennale esperienza nella progettazione di strutture metalliche per edilizia e infrastrutture (società ASF del Gruppo Archest).



Stefano Costantini

Direttore tecnico e socio di Archest, si è occupato di sviluppare numerosi progetti nazionali e internazionali ricoprendo il ruolo di Project Manager e Direttore dei Lavori.



Lorenzo Paroni

Attualmente ricopre il ruolo di direttore operativo di Archest. Ventennale esperienza in progettazione architettonica e strutturale, esecutiva e costruttiva di interventi in Italia e all'estero.



Federico Iori

Socio fondatore e direttore tecnico di ASF del Gruppo Archest. Esperienza nella progettazione di strutture a grande luce e complesse in acciaio, che includono coperture di stadi e ponti. Esperienza in metodi di montaggio speciali.

DAL CONGRESSO **CTA** DI FRANCAVILLA AL MARE 2022

“SCHELETRO MONUMENTALE” del “Palazzo di Cristallo” ex Innocenti Maserati. Un valore storico da conservare. Città dell’Esperienza e della Ricerca

“MONUMENTAL SKELETON” OF THE “CRYSTAL PALACE” EX INNOCENTI MASERATI. A HISTORICAL VALUE TO BE PRESERVED. CITY OF THE EXPERIENCE AND RESEARCH

Arch. Metòdi Marco Cavallotti*

Il presente articolo è stato premiato al congresso CTA di Francavilla al Mare 2022 nell’ambito del concorso per laureandi Best Thesis Awards.

Il Patrimonio industriale milanese del XX secolo è caratterizzato dalla presenza di diverse realtà architettoniche e ingegneristiche in stato di degrado e di abbandono. La città di Milano sta sia adottando Piani di Recupero in risposta alla Rigenerazione Urbana del contesto milanese, sia rispondendo alle nuove richieste di Sostenibilità Ambientale e rispetto del Territorio Costruito. Nel mio ultimo anno del Corso Magistrale di Architettura Ambiente

Costruito Interni, nell’ A.A. 2020 – 2021 al Politecnico di Milano, ho conseguito un Workshop di Tesi denominato: Architettura d’Autore del XX secolo. Conservazione, Progetto e Riuso. L’architettura industriale presa in esame è costituita dall’identità strutturale metallica del capannone noto come “Palazzo di Cristallo” ex Innocenti Maserati, casa della produzione della Lambretta, collocato nel quartiere Nord-Est di Lambrate, via Rubattino, Milano. Il caso studio, rapportandosi con un paesaggio in parte abbandonato e in parte riqualificato, è caratterizzato da un’identità storica, strutturale, oggi in stato di conservazione di degrado caratterizzato dal proliferare di vegetazione spontanea. “Il

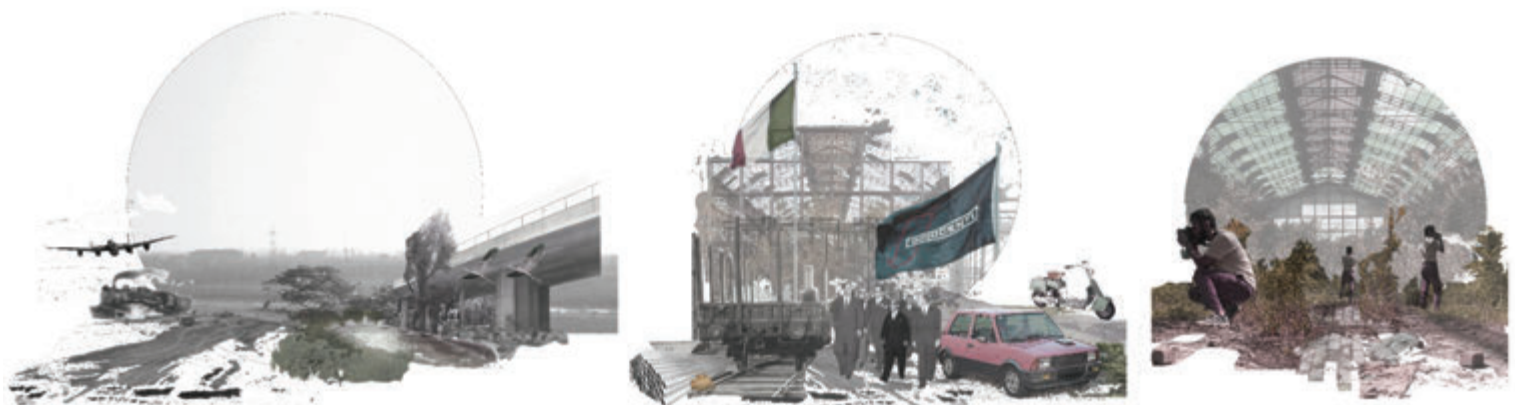


Figura 1 | Cartoline suggestive che raccontano la trasformazione del sito di Lambrate e dello “Scheletro Monumentale” del “Palazzo di Cristallo” ex Innocenti Maserati. via Rubattino, Lambrate, Milano. Passato e Presente

*Corresponding author. Email: cavallottimarco93@gmail.com

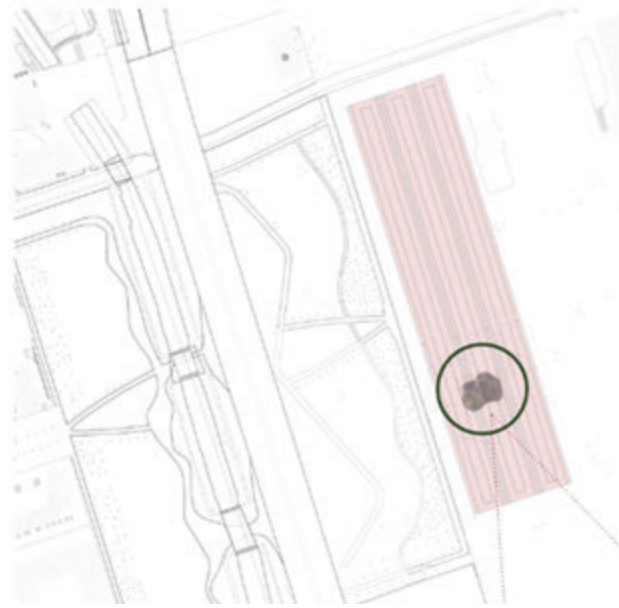


Fig. 68 | Carta tecnica comunale di Milano. Geoportuale 2012

Sistema Covre, l'alleggerimento strutturale" è la chiave di lettura di questa struttura metallica in acciaio. Una struttura, la quale un tempo, nei giorni "gloriosi" delle grandi opere siderurgiche, era testimonianza di una innovazione poetica, formale, architettonica ed ingegneristica di un tecnico delle strutture come Gino Covre. La monumentalità intrinseca nella struttura del "Palazzo di Cristallo" ex Innocenti Maserati è stato quindi il motivo che mi ha portato alla stesura della Tesi sotto un "profilo" strutturale e di proposta teorica di un progetto conservativo di ripristino, recupero, riuso, e ridefinizione funzionale. Lo "Scheletro Monumentale", appartenente al Patrimonio Industriale italiano del XX secolo, è testimonianza strutturale disegnata da Gino Covre e realizzata dall'Ing. Giuseppe Riccardo Badoni, due autori delle Costruzioni Metalliche del XX secolo, promotori del "Sistema Covre e dell'alleggerimento strutturale" in Italia. (figure 1-2).

The Milanese industrial heritage of the twentieth century is characterized by the presence of various architectural and engineering realities in a state of degradation and abandonment. The city of Milan is both adopting Recovery Plans in response to the Urban Regeneration of the Milanese context and responding to the new requests for Environmental Sustainability and respect for the Built Territory. In my last year of the Master Course of Architecture Built Environment Interiors, in the A.Y. 2020 – 2021 at the Politecnico di Milano, I obtained a Thesis Workshop called: Architettura d'Autore del XX secolo. Conservation, Design and Reuse. The industrial architecture examined consists of the metallic structural identity of the shed known as "Palazzo di Cristallo" ex Innocenti Maserati, home of the production of Lambretta, and not only, located in the North-East district of Lambrate, via Rubattino, Milan. The case study, relating to a landscape partly abandoned and partly redeveloped, is characterized by a historical, structural identity, today in a state of conservation of degradation characterized by the proliferation of spontaneous vegetation. "The Covre System, structural lightening" is the key to understanding this metal steel

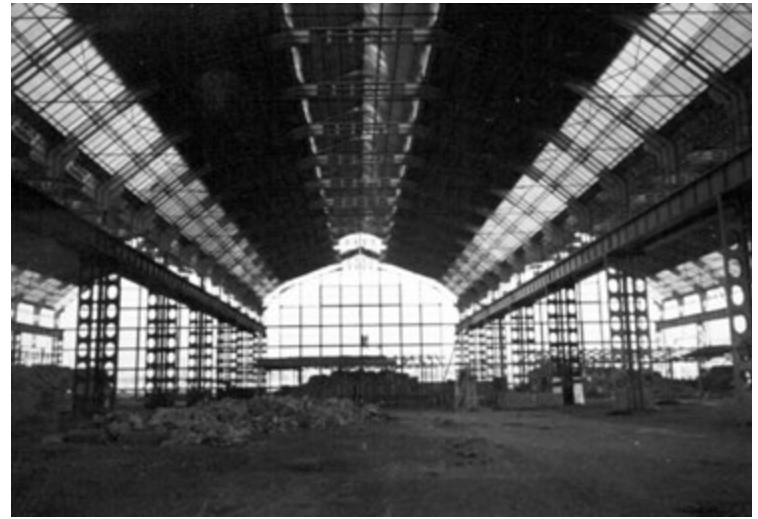


Fig. 67 | La copertura del "Palazzo di Cristallo", 1946. Via Rubattino, Milano [Foto scattata da Fot. ARAGOZZINI - c.ca 1946]



Fig. 69 | L'inesistenza della copertura "Palazzo di Cristallo", Via Rubattino, Milano. Inquadratura della campata, foto eseguita durante il sopralluogo, Aprile 2021

Figura 2 | Estratto pagina Tesi: Struttura del "Palazzo di Cristallo" ex Innocenti Maserati - confronto tra Ieri (1946) fig. 67 e Oggi (2021) figg. 68 - 69

structure. A structure, which once, in the "glorious" days of the great iron and steel works, was testimony to a poetic, formal, architectural and engineering innovation of a structural technician like Gino Covre. The intrinsic monumentality in the structure of the "Palazzo di Cristallo" ex Innocenti Maserati was therefore the reason that led me to write the Thesis under a structural "profile" and theoretical proposal of a conservative project of restoration, recovery, reuse, and redefinition and refunctionalization. The "Monumental Skeleton", belonging to the Italian Industrial Heritage of the twentieth century, is a structural testimony designed by Gino Covre and built by Ing. Giuseppe Riccardo Badoni, two authors of the Metal Constructions of the twentieth century, promoters of the "Covre System and structural lightening" in Italy (figures 1–2).

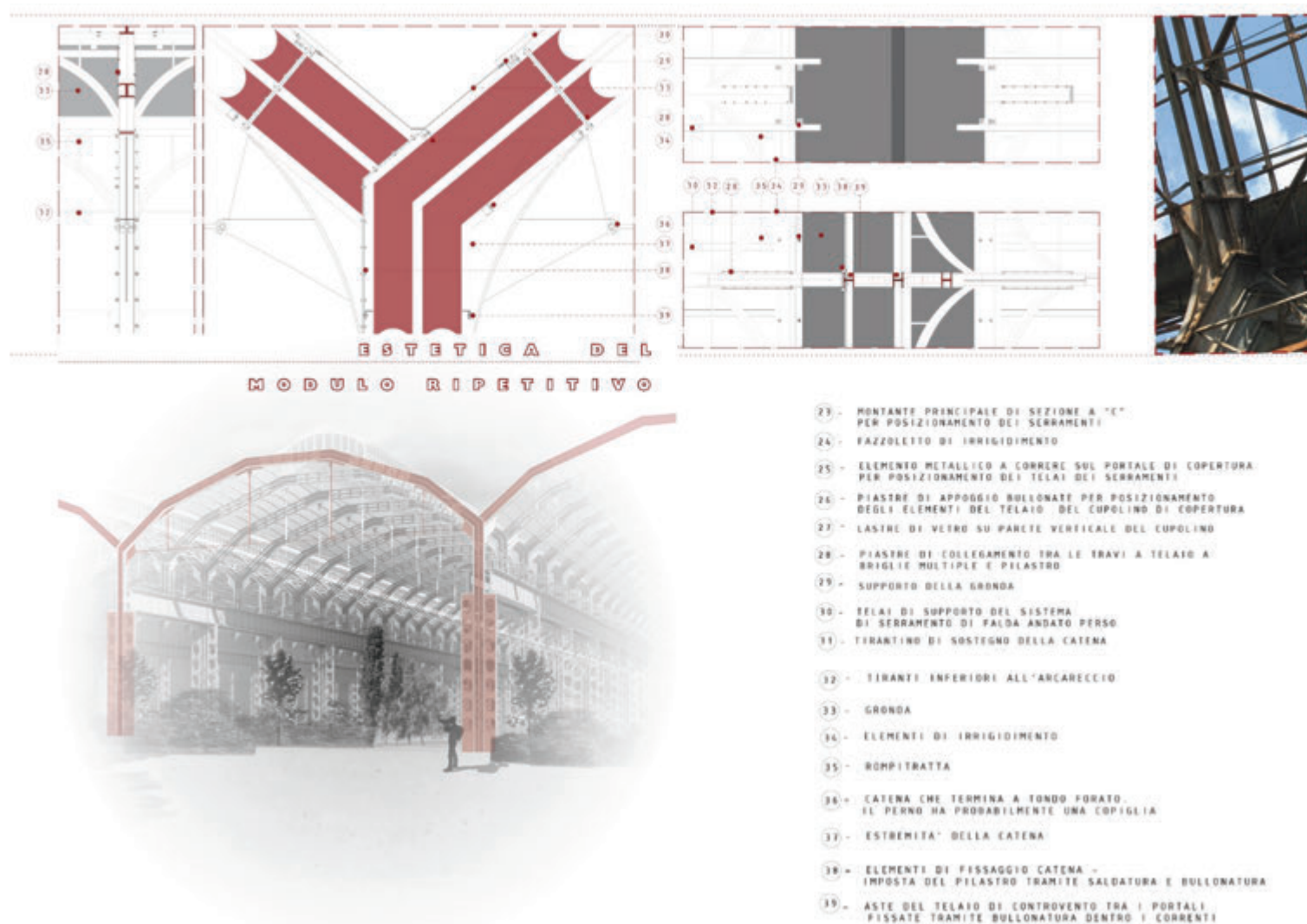


Figura 3 | Nodo strutturale "tipo" – Ridisegno e analisi delle componenti della struttura metallica, legenda – elemento di assemblaggio colonna – copertura. Elaborazione grafica del quarto aspetto del "Sistema Covre" - L' "Estetica del modulo ripetitivo" nel "Palazzo di Cristallo" ex Innocenti Maserati.

1. Il "Sistema Covre – L'alleggerimento strutturale" nella struttura metallica in acciaio del "Palazzo di Cristallo" ex Innocenti Maserati, Milano.

Le costruzioni metalliche, realizzate sotto la direzione dell'Ing. Giuseppe Riccardo Badoni e su disegno dei brevetti di Gino Covre, trovano massima espressione di innovazione per le grandi strutture in acciaio come quella del "Palazzo di Cristallo" Ex Innocenti Maserati. Il suo scheletro strutturale è testimonianza della storicità materica nella composizione formale, strutturale, tecnologica, architettonica e poetica della storia delle costruzioni metalliche nel primo periodo del 1900. Di un portale strutturale "tipo" ho ridisegnato una serie di nodi costitutivi dello scheletro metallico realizzato con la tecnica di assemblaggio ibrido: chiodatura, saldatura e bullonatura (figura 3). L'autorialità architettonica è nel disegno strutturale innovativo di Gino Covre, un tecnico che, di fronte al problema di approvvigionamento del materiale dell'acciaio, è riuscito a proporre strutture in grado di rispondere alle esigenze tecniche di stabilità e resistenza, tramite il "Sistema Covre – L'alleggerimento strutturale" brevettato il 10 settembre 1936.

Aspetti rilevanti ed autentici riconoscibili nello scheletro del

"Palazzo di Cristallo" ex Innocenti Maserati sono: 1) Trave a telaio a briglie multiple, 2) Struttura portante alleggerita, 3) Eliminazione delle aste diagonali della capriata, 4) Estetica del modulo ripetitivo, (figura 3).

2. Stato di conservazione della Struttura metallica del "Palazzo di Cristallo" – La corrosione

Lo stato di conservazione strutturale è prevalentemente condizionato da uno stato di deterioramento a causa della corrosione atmosferica, in quanto ad oggi la struttura metallica del "Palazzo di Cristallo" ex Innocenti Maserati è esposta alle intemperie. La trattazione del capitolo sull'analisi del degrado sulle strutture (figura 4), mi ha permesso di porre attenzione in una proposta di progetto di restauro conservativo sull'intera struttura tramite la tecnica del "Ciclo di verniciatura", un intervento costituito da una pulizia meccanica in sito senza smontaggio dello scheletro strutturale con successive fasi di preparazione della superficie metallica: dalla fase di sabbatura a quella di un ciclo di pitturazione di colore grigio chiaro da valorizzare l'aspetto estetico del metallo.

3. Progetto di ridefinizione funzionale sotto lo “Scheletro Monumentale” del “Palazzo di Cristallo” ex Innocenti Maserati. Un valore storico da conservare. Città dell’Esperienza e della Ricerca

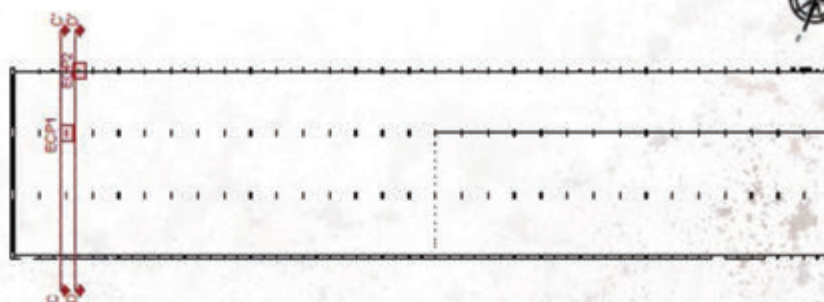
Il Progetto di ridefinizione funzionale prevede la collocazione di padiglioni costituiti in vetro, muratura e legno con tetti a giardino. Conservazione, esperienza e ricerca e sviluppo sostenibile sono i temi che esprimono la poesia del Progetto e del valore storico da conservare in questo sito. Funzioni legate al Museo della Lambretta, all’Auditorium per ospitare Congressi dei grandi Ingegneri e Tecnici

delle Costruzioni Metalliche, spazi di ristorazione e di vendita e di coltivazione a km 0 per rievocare l’identità agricola del Territorio. Una Città dell’Esperienza e della Ricerca, sviluppata su due livelli, trova armonia con il contesto naturale circostante (figura 5). La scoperta dell’innovazione tecnica e la sperimentazione formale dell’autore della struttura non deve esser conosciuto a puro scopo documentativo, ma deve permettere un approccio di riflessione sul tema dell’innovazione strutturale ed architettonica in fase di recupero del complesso industriale.

Analisi del DEGRADO sui giunti di assemblaggio / nodi strutturali “tipo” - Fase 1 del progetto

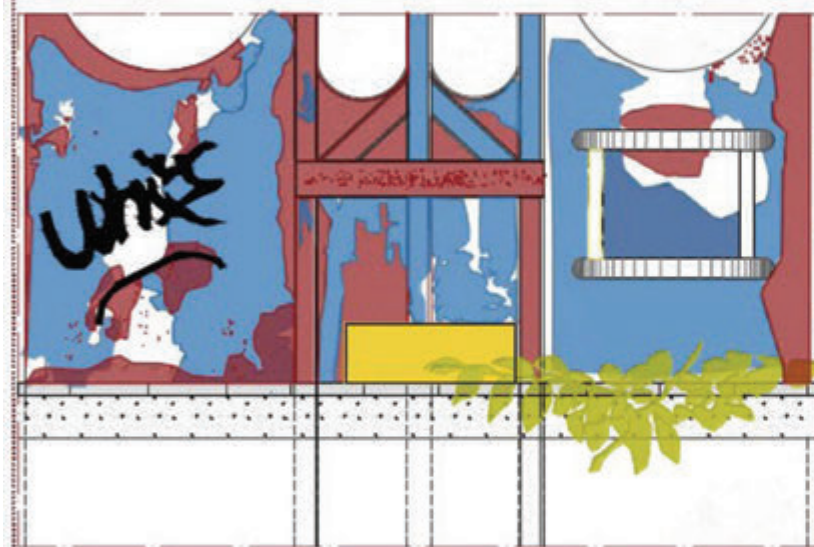
Fenomeni di degrado riscontrati sugli elementi compositivi del “sistema Corvre”

Cfr. tavola 8 - Scala di rappresentazione 1: 10



E.C.P. 1 : ELEMENTO COSTRUTTIVO PORTALE 1

E.C.P. 2 : ELEMENTO COSTRUTTIVO PORTALE 2



PARTICOLARE 1
SCALA 1 : 20

CORROSIONE



ESFOLIAZIONE



GRAFFITO VANDALICO



MANCANZA



PROLIFERAZIONE VEGETAZIONE SPONTANEA



Figura 4 | Stato di conservazione della struttura metallica del “Palazzo di Cristallo” ex Innocenti Maserati. Analisi del Degrado

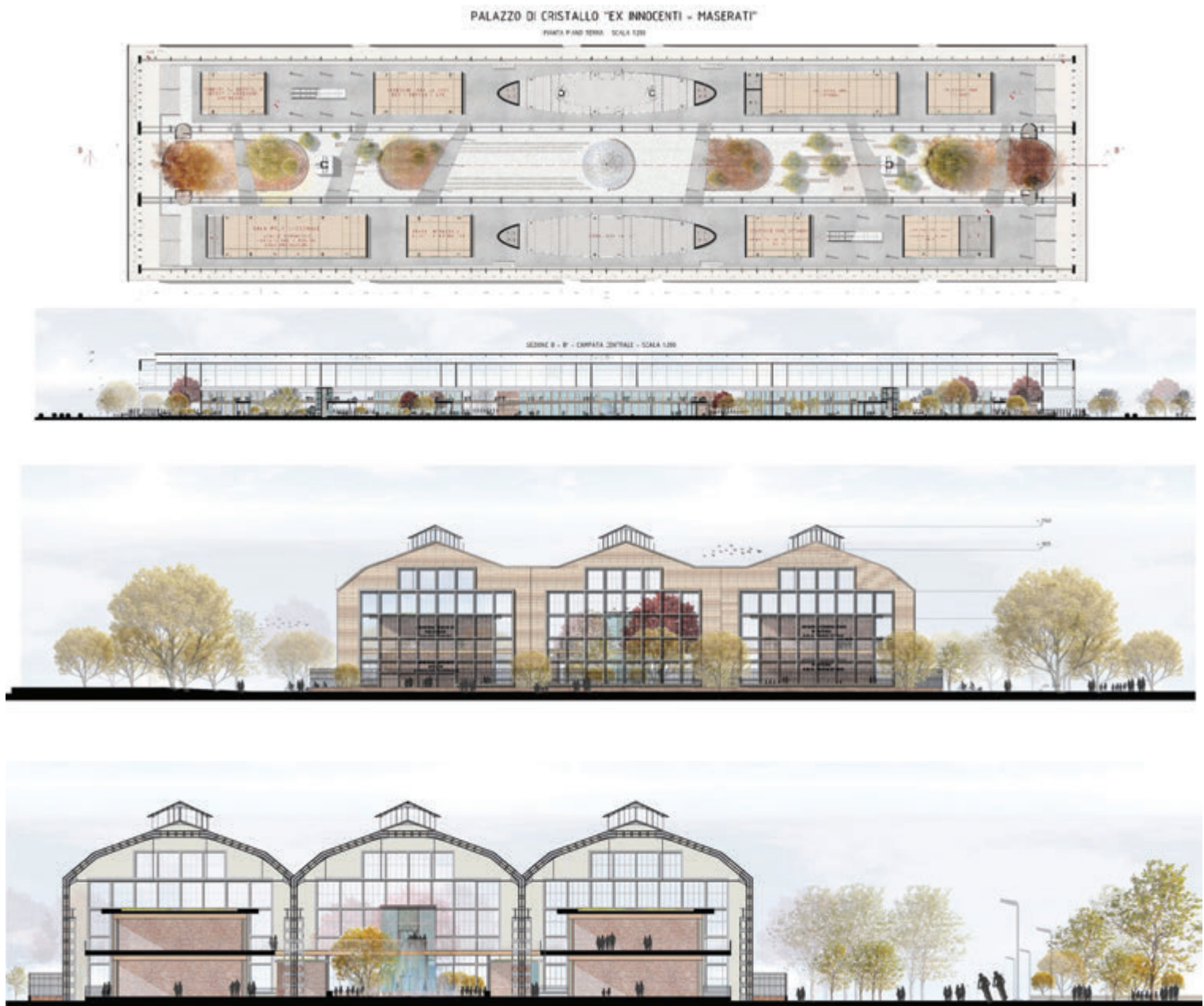


Figura 5 | PROGETTO: PIANTA PIANO TERRA, SEZIONE LONGITUDINALE della CAMPATA CENTRALE, PROSPETTO SUD - valorizzazione del mantenimento della facciata con caratteri morfologici, architettonici e tipologici appartenenti all'architettura industriale italiano del XX secolo, SEZIONE CENTRALE con la rappresentazione di una fontana d'acqua e dell'albero, quali elementi naturali che simboleggiano la rinascita del "Palazzo di Cristallo" ex Innocenti Maserati

CONCLUSIONI

Sono molto rassicurato che le ipotesi di conservazione storica esposte nella Tesi siano scelte che trovano un "Percorso organico" con quanto può avvenire nei prossimi mesi. Questo perché nella fase conclusiva dell'elaborazione della Tesi, novembre 2021 è stato indetto dal Comune di Milano un Concorso Internazionale "Magnifica Fabbrica" per la Rigenerazione Urbana del sito con le precise indicazioni del mantenimento della struttura metallica "Palazzo di Cristallo", delle facciate Nord e Sud quale simbolo di un'identità architettonica appartenente al Patrimonio Industriale del XX secolo prevedendo l'ampliamento del Parco Rubattino al di sotto dello "Scheletro Monumentale".

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio nel campo della Disciplina del Restauro il Relatore Prof.

Davide Del Curto e la Correlatrice Prof.ssa Maria Francesca Lucia Albani. Per il supporto formativo nel campo della Disciplina di Architettura, ringrazio i "Mentori" Arch. Ippolito Celio Calcagnini Estense, Arch. Alessandro Contini e l'Arch. Cristiano Mazzi. Un ringraziamento particolare per il supporto nella trattazione della Disciplina di Strutture e approfondimenti storici delle vicende storiche italiane delle costruzioni metalliche va agli Ingg. Riccardo De Col, Fausto Giovannardi Guido Emiliano. Si ringrazia il Sig. Mirco Monfredini, Presidente del Centro Archivio Storico Innocenti per il supporto di condivisione di materiale storico e delle testimonianze sulle vicende del "Palazzo di Cristallo" ex Innocenti Maserati. Ringrazio il Sig. Vittorio Tessera, Responsabile del Museo dello Scooter e della Lambretta, a Rodano (MI) per la condivisione di documentazione storica, fotografica, tecnica la quale, in parte riportata nella Tesi, testimonia la fase cantieristica

dello stabilimento del grande Imprenditore Ing. Ferdinando Innocenti a Lambrate.

metallica". CTA, Collegio dei tecnici dell'acciaio, Firenze

- Marino Gamba,(1976) "Innocenti. Imprenditore, fabbrica, classe operaia in cinquant'anni di vita italiana"
- L. Cascini, F. Portioli, R. Landolfo. "La corrosione atmosferica" XXI congresso CTA. Costruire con l'acciaio, 1 - 3 ottobre 2007

BIBLIOGRAFIA

- Ing. Fausto Giovannardi (2021) "Gino Covre. Vita e Opere"
- Vittorio Nascè. (1982). "Contributi alla storia della costruzione



Metodi Marco Cavallotti

Laureato il 21 dicembre 2021 in Architettura Ambiente Costruito Interni - Architecture Built Environment Interiors presso il Politecnico di Milano, frequenta nello Studio associato d.n.a. dynamic network architects il Tirocinio Professionale attestato dall'Ordine degli Architetti di Milano. Dopo il Tirocinio e l'Esame di Stato di abilitazione, consolida esperienze professionali presso gli Studi di Architettura degli Architetti: Ippolito Calcagnini Estense, Alessandro Contini e Giuseppe Magistretti.

ABBONARSI AL CTA!

Dal 1966 per lo studio e il perfezionamento della tecnica della costruzione metallica

I VANTAGGI

- 6 numeri della rivista COSTRUZIONI METALLICHE in formato cartaceo ed elettronico
- 1 quaderni e le pubblicazioni tecniche in uscita nell'anno
- Sconti sulle pubblicazioni arretrate
- partecipazione a quote ridotte ai nostri webinar, seminari e corsi e al Congresso
- Libero accesso all'Archivio di Costruzioni Metalliche ed altre pubblicazioni tecniche sul sito CTA collegiotecniciacciaio.it

CTA
COLLEGIO DEI TECNICI DELL'ACCIAIO

[in c-t-a-collegio-dei-tecnici-dell'acciaio](https://www.linkedin.com/company/c-t-a-collegio-dei-tecnici-dell'acciaio) collegiotecniciacciaio.it [f CollegioTecniciAcciaio](https://www.facebook.com/CollegioTecniciAcciaio)

Da tempo il CTA attraverso la rivista *Costruzioni Metalliche* cerca di focalizzare l'attenzione sul tema delle costruzioni a secco. Tema molto ampio e non legato necessariamente all'impiego di un monomateriale. Anzi la costruzione a secco è proprio l'incontro di diverse tipologie costruttive che spingono ad ottenere il massimo rendimento prestazionale delle costruzioni nel rispetto di resistenza strutturale nei confronti di tutte le azioni di progetto, manutenibilità, sostenibilità e contenimento dei costi.

L'utilizzo dell'acciaio ci permette di entrare anche nel campo di utilizzo dei profili leggeri, congeniale per edifici di dimensioni contenute e regolari.

Si presentano qui due testi di autori italiani che aiutano ad entrare in questo complesso mondo della costruzione.

Il primo è quello di Marco Imperadori, che è anche l'editorialista di questo numero di *Costruzioni Metalliche*.



Il titolo è: “Active house. Progettazione e innovazione con tecnologie di costruzione stratificata a secco”, edito da Maggioli (2019).

Si tratta di un sistema di costruzione che mette alla base il rispetto di alcuni obiettivi fondamentali quali la costruibilità, la sicurezza complessiva e la gestibilità associata alle nuove esigenze ambientali, di risparmio di tempo e di sempre maggior comfort (benessere). Molto congeniali appaiono le ossature leggere, capaci di assorbire, alla bisogna, eventi eccezionali come sismi, esplosioni, fuoco ed altro, cioè dotate di robustezza come si usa dire più frequentemente oggi.

Un campo che vede impegnati moltissimi ricercatori in ogni parte del mondo che, come un fuoco, sta scaldando sempre di più il settore della costruzione, molto legato per ora ai sistemi tradizionali ad umido. C'è ancora moltissimo da scoprire in questo campo nuovo perché c'è grande circolazione di idee, voglia di sperimentare e di provare a costruire. Il libro di Marco Imperadori è ricchissimo di esempi reali e recenti e mostra, numeri alla mano, come non sia lontano il traguardo di costruire edifici a bassissimo consumo energetico e con utilizzo di energie rinnovabili.

Un libro da vedere, sfogliare ed arricchirsi pagina per pagina.

Marco Imperadori

Con: Arianna Brambilla, Federica Brunone, Lone Feifer, Graziano Salvalai, Andrea Vanossi

Active house. Progettazione e innovazione con tecnologie di costruzione stratificata a secco

Editore: Maggioli | Anno: 2019 | Pagine: 425 | Euro 39.00



Il testo: “Progettare e Costruire Edifici Sostenibili con Profili in Acciaio Sagomati a Freddo - l'innovazione tecnologica delle soluzioni in *light steel frame* per l'edilizia”, uscito nel 2022, autrice Marta Maria Sesana, ricercatrice in architettura tecnica che opera presso l'Università degli studi di Brescia al dipartimento di ingegneria civile, ambiente, territorio, architettura e matematica, rappresenta l'aggiornamento più completo oggi disponibile sul tema delle costruzioni a secco con tecnologia a profili sottili di acciaio piegati a freddo.

Editore del volume è Dario Flaccovio per la collana dei testi tecnico-scientifici di FPA, Fondazione Promozione Acciaio.

La nostra edilizia è da tempo ancorata a sistemi costruttivi antiquati e costosi, poco flessibili e difficili da manutenzionare.

Da tempo si sente la spinta verso un'evoluzione del modo di costruire dai sistemi tradizionali a sistemi industrializzati, anche se, purtroppo, non ci sono stati significativi passi avanti per un'inculturazione di tale problema.

Il testo della Sesana è il risultato di anni di ricerca sulla progettazione e costruzioni di edifici sostenibili condotta dall'autrice in collaborazione con ricercatori e docenti di diversi atenei nazionali e internazionali e di confronto con diverse aziende del settore.

Si presentano alcuni esempi di costruzioni stratificate a secco con struttura metallica in profili sagomati a freddo analizzandoli in termini prestazionali per

evidenziarne potenzialità ed applicazioni.

C'è veramente bisogno di creare una nuova mentalità del costruire ed il contributo di Marta Maria Sesana va proprio in questa linea. Il suo lavoro, unitamente a quello dei suoi collaboratori del Politecnico di Milano, consiste nella raccolta di anni di ricerca svolta a livello nazionale. Dice l'autrice che l'idea nasce verso l'autunno del 2021: si mettono insieme una moltitudine di documenti di ricerca e di sperimentazione, si raccolgono documentazioni relative a costruzioni reali svolte da aziende, alcune competitor tra di loro, e se ne fa, sotto la spinta di Fondazione Promozione Acciaio, una piccola enciclopedia di questo nuovo modo di pensare le costruzioni. C'è bisogno di una svolta nelle costruzioni imposta dal cambiamento del modo di vivere della gente, dall'urto della variabilità delle condizioni ambientali.

Ed ancora: la costruzione off site (a secco) porta maggior precisione in tutte le fasi della sua realizzazione a partire dalla progettazione, per spingersi al controllo dei materiali e dei componenti, alla loro posa, al controllo dei tempi di montaggio, alla riduzione di incidenti di cantiere che oggi rappresenta un costo nascosto, ma enorme, che affligge l'edilizia nazionale.

I Light Steel Frame (LSF) sono molto diffusi in paesi anglosassoni e del Nord dove a volte riesce difficile a scorgerne la differenza rispetto ai sistemi di tipo tradizionale. Ed inoltre sono anche presenti in moltissimi altri settori dell'ingegneria: meccanica, aeronautica e ferroviaria. Quindi sono del tutto affidabili specie nei riguardi del sisma e del fuoco.

Nel libro è indicato anche un esempio di recupero di una vecchia struttura tradizionale posta in un centro storico della Sardegna reso possibile grazie alla leggerezza dei vari componenti strutturali, impegnando mezzi di trasporti molto piccoli per poter passare tra le strettissime vie del borgo.

Ancora due parole sulla struttura del libro che è articolato in due parti.

Nella prima parte vengono approfonditi aspetti normativi e metodologici in relazione al mercato dell'acciaio e delle costruzioni su tematiche quali: l'efficienza energetica, l'industria 4.0, la digitalizzazione l'economia circolare

Nella seconda parte viene fornita una panoramica sulle aziende italiane leader di soluzioni stratificate a secco con un'ampia casistica di realizzazioni.

È auspicabile che lavori come questo vengano conosciuti dagli ingegneri strutturalisti e dagli architetti, dai giovani imprenditori affinché si possa veramente iniziare una nuova era del costruire.

Marta Sesana

Progettare e Costruire Edifici Sostenibili con Profili in Acciaio Sagomati a Freddo

l'innovazione tecnologica delle soluzioni in *light steel frame* per l'edilizia

Fondazione Promozione Acciaio

Dario Flaccovio Editore | Anno: 2022 | Pagine: 287 | Euro 51.00

(A cura di Riccardo De Col)

Campagna
Abbonamenti
2023

Clicca qui o
inquadra il QR

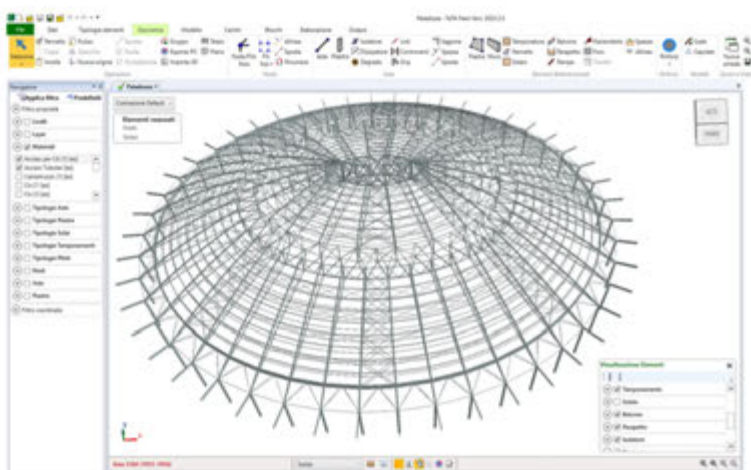
2022
Abbonamento annuale
COSTRUZIONI
METALLICHE

2021
Abbonamento annuale
COSTRUZIONI
METALLICHE



la soluzione per il calcolo strutturale

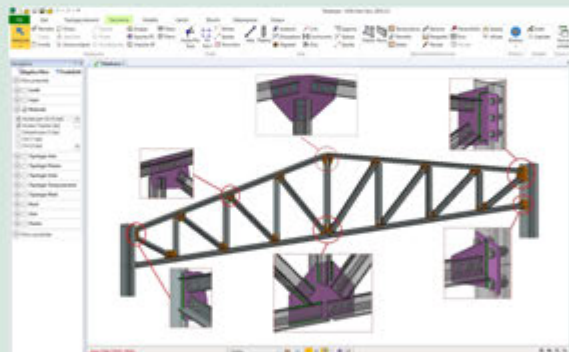
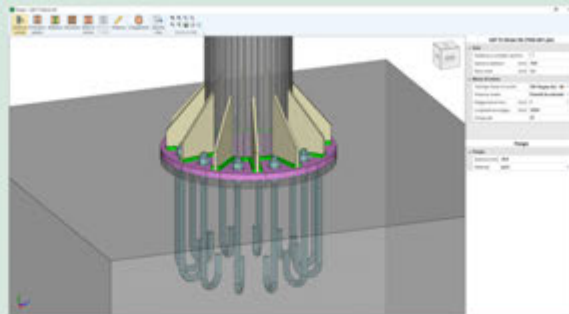
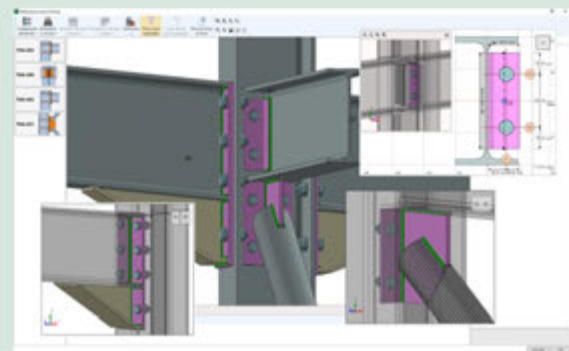
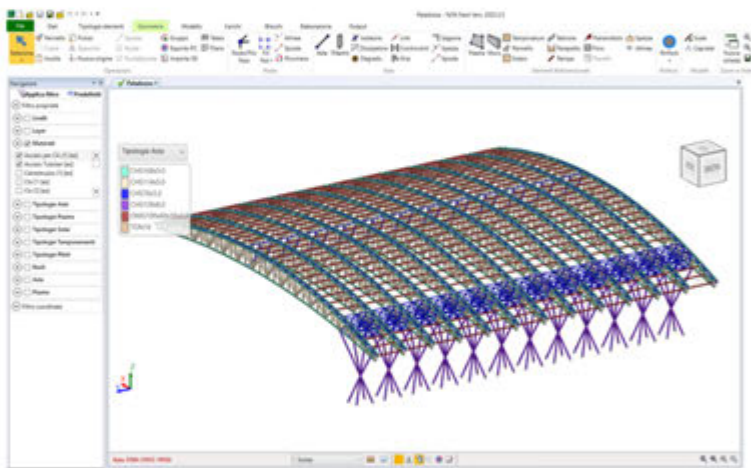
SOFTWARE PER LA MODELLAZIONE, L'ANALISI E LA VERIFICA DI STRUTTURE IN C.A., ACCIAIO, LEGNO, MURATURA



PalaDozza - Palazzetto dello Sport di Bologna (particolare copertura in acciaio).
Studio sulla vulnerabilità sismica effettuato con FaTA Next da TESA INGEGNERIA s.p.a.r.l. - Roma



lo strumento ideale per le diverse soluzioni progettuali delle strutture metalliche.



www.stacec.com



RICHIEDI IL CODICE SCONTO

Disponibile il Plugin di esportazione per



novità



ArcelorMittal

ArcelorMittal apre la strada verso un acciaio a ridotto impatto ambientale



Steligenca® Engineering

Offre supporto alla progettazione di soluzioni per impalcati misti acciaio-calcestruzzo per identificare la soluzione piu' adatta al progetto studiato.

L'utilizzo di gradi di acciaio alto-resistenziali (anche in qualità autopassivante secondo EN10025-5) permette di contenere l'incidenza in peso della carpenteria.

Grazie all'acciaio XCarb® è possibile inoltre minimizzare l'impatto ambientale della carpenteria rispetto ad un acciaio tradizionale grazie ad un processo di garanzia del processo produttivo e dell'approvvigionamento energetico.

Steligenca® Fabrication Center

Il centro lavorazioni integrato agli stabilimenti siderurgici offre a carpenterie ed imprese generali la possibilità di ordinare travi da ponte prelaborate parzialmente o integralmente (taglio a misura, centinatura, piolatura, saldatura di piastrame ed accessori, sistema di verniciatura) e di studiare soluzioni logistiche adattate ad ogni progetto.

Oltre al tradizionale trasporto su gomma (con possibilità di trasporti eccezionali per elementi fino a 40m di lunghezza), si prediligono soluzioni a basso impatto ambientale quale il trasporto su rotaia o per via fluviale e marittima, rese possibili dalla localizzazione favorevole del centro lavorazioni.



Contatto tecnico:

steligenca.engineering@arcelormittal.com

fischer 

FAZ II Plus.
L'ancorante a battere
certificato per carichi
sismici e dinamici.



Scopri di più su www.fischer.it



LA ZINCATURA A CALDO: DURABILITÀ, SICUREZZA, SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE.



La zincatura a caldo è il sistema di protezione più efficace per l'acciaio.

È un trattamento anticorrosivo dell'acciaio che si applica immergendo i manufatti in un bagno di zinco fuso dopo una serie di pretrattamenti.

Con il processo di zincatura a caldo, lo strato di zinco metallico che riveste l'acciaio non è una semplice pellicola coprente come avviene con gli altri trattamenti anticorrosivi (es. verniciatura): durante l'immersione nello zinco fuso si forma una vera e propria lega ferro-zinco.

È possibile zincare grandi e piccole strutture: Pilastri, tubazioni, serbatoi, serre, capriate, arredo urbano, impianti di risalita, recinzioni, grigliati, tubazioni, tralicci, infissi, paletti, arredo urbano, impianti di risalita, tondino per calcestruzzo armato, gru, ponteggi, bulloni: una lista che sarebbe infinita in quanto tutto ciò che è acciaio può

essere zincato.

La zincatura a caldo protegge le strutture in acciaio per un tempo che spesso supera anche il ciclo di vita utile delle strutture; collabora positivamente a ridurre nel tempo il carico ambientale di una costruzione e è ecosostenibile; preservando dalla corrosione mantiene inalterate le caratteristiche progettuali, collaborando alla sicurezza generale di un'opera; ha un costo iniziale contenuto e paragonabile ad altri sistemi anticorrosivi; non richiedendo manutenzioni per decenni, riduce di molto il costo nel tempo di un'opera.

Zincare a caldo è un perfetto esempio di applicazione di economia circolare nell'industria per diversi fattori: dalla maggior protezione contro la corrosione, alla minor manutenzione necessaria alla struttura in acciaio zincato. Si aggiunge la possibilità di riutilizzare per

più cicli il rivestimento galvanizzato.

Inoltre la zincatura a caldo è un trattamento efficace per contrastare gli effetti di un incendio: è in grado di rallentare il surriscaldamento degli elementi strutturali in acciaio sottoposti all'azione del fuoco, allungando i tempi utili per l'evacuazione dell'edificio in fiamme.

Progettare un edificio oggi dovrebbe prendere in considerazione sia il valore di sicurezza che tale aspetto della zincatura presenta per gli elementi portanti della struttura, sia il fatto che i componenti in acciaio zincato risultano riutilizzabili e riciclabili, riducendo l'uso di risorse non rinnovabili.

www.giambarinigroup.it



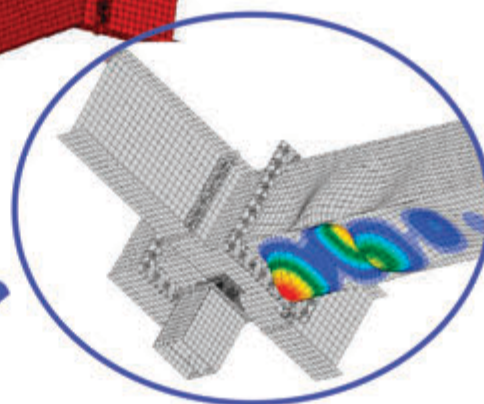
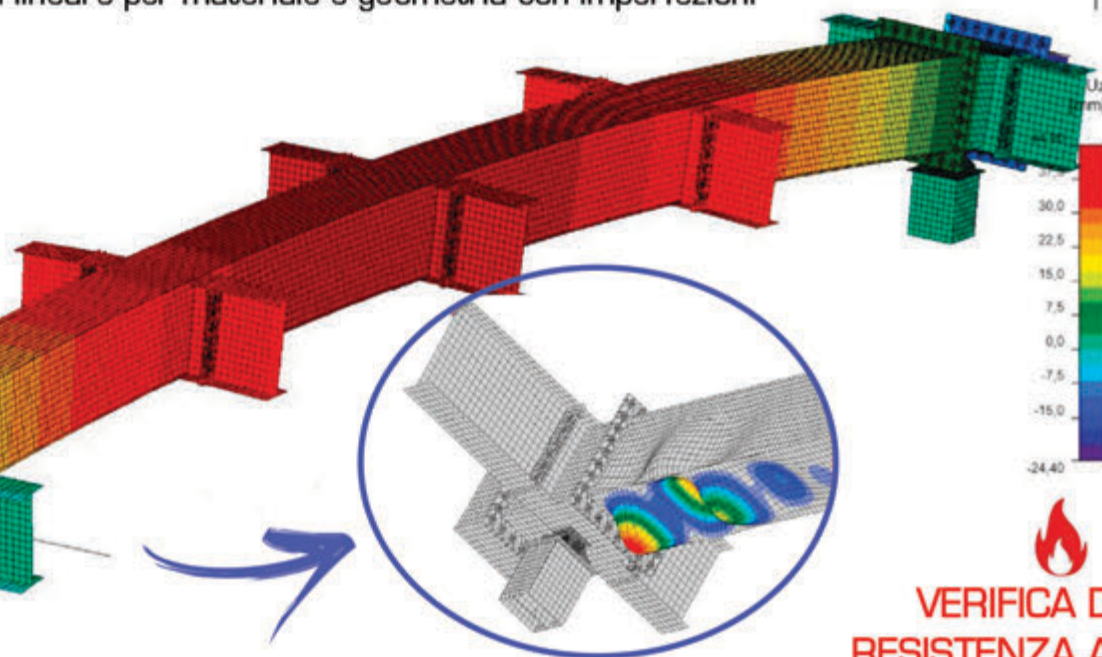
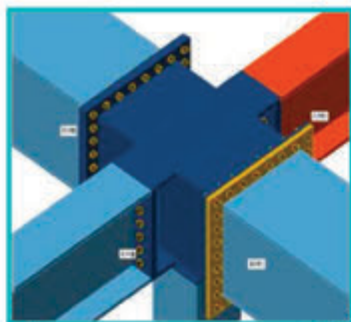
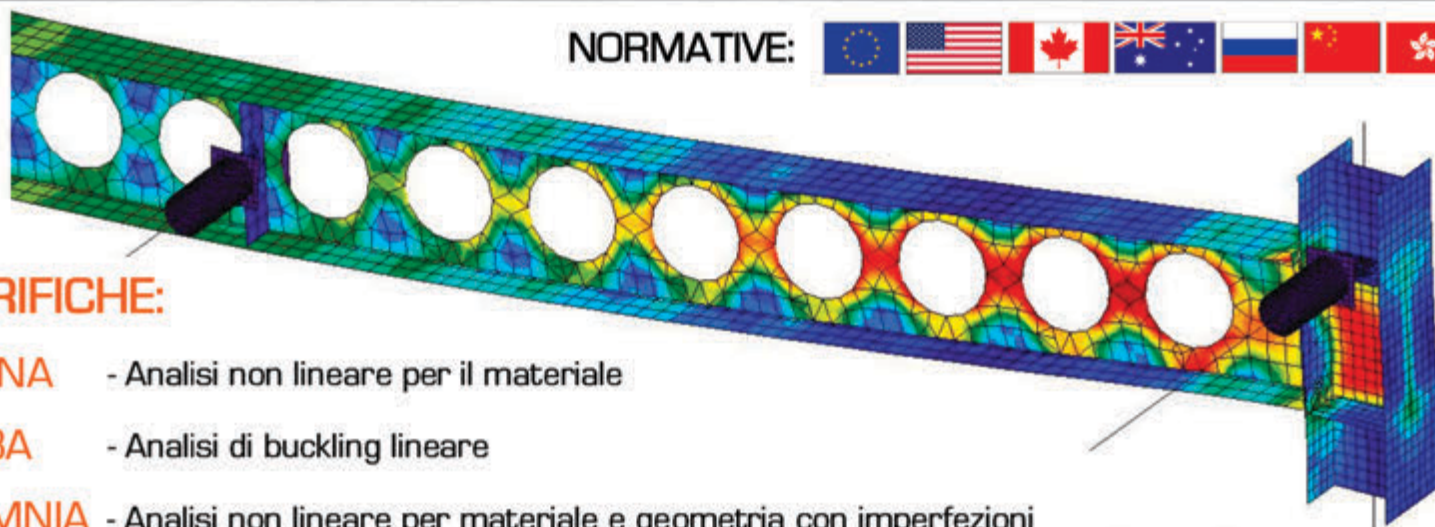
GIAMBARINI GROUP

NORMATIVE:

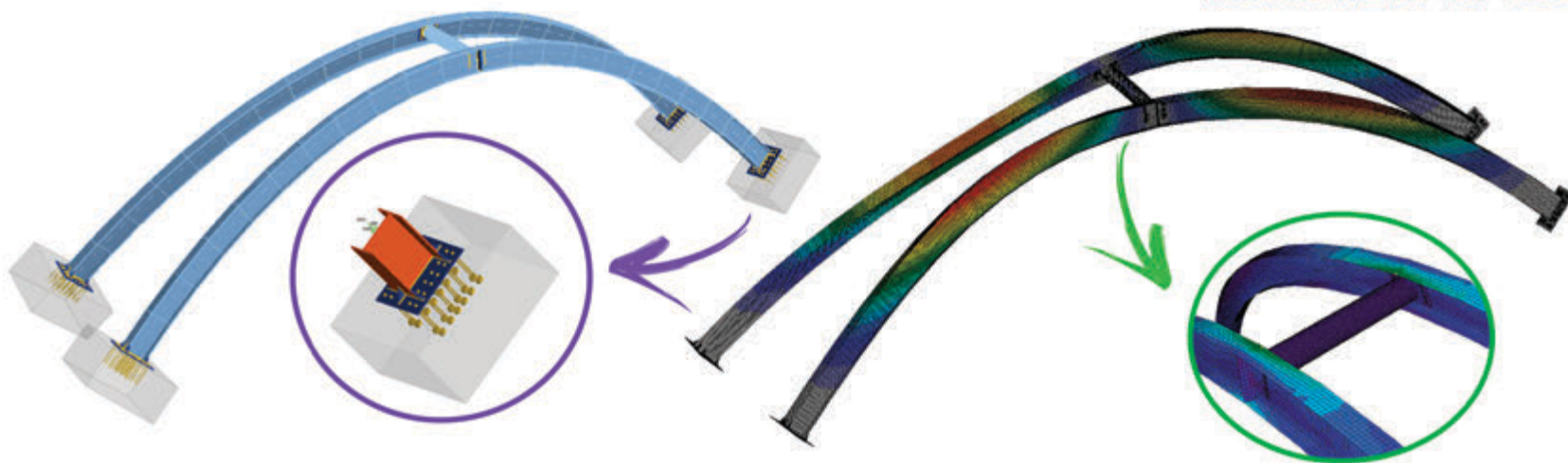


VERIFICHE:

- **MNA** - Analisi non lineare per il materiale
- **LBA** - Analisi di buckling lineare
- **GMNIA** - Analisi non lineare per materiale e geometria con imperfezioni




**VERIFICA DELLA
RESISTENZA AL FUOCO**



NUOVO, POTENTE, AFFIDABILE, COMPLETO...

RIVOLUZIONARIO!

Niente più problemi con le giunzioni metalliche...

CDJ *Win*

Computer Design of Joints

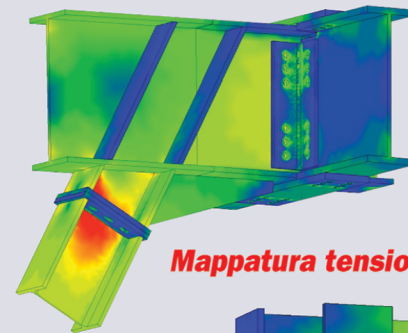
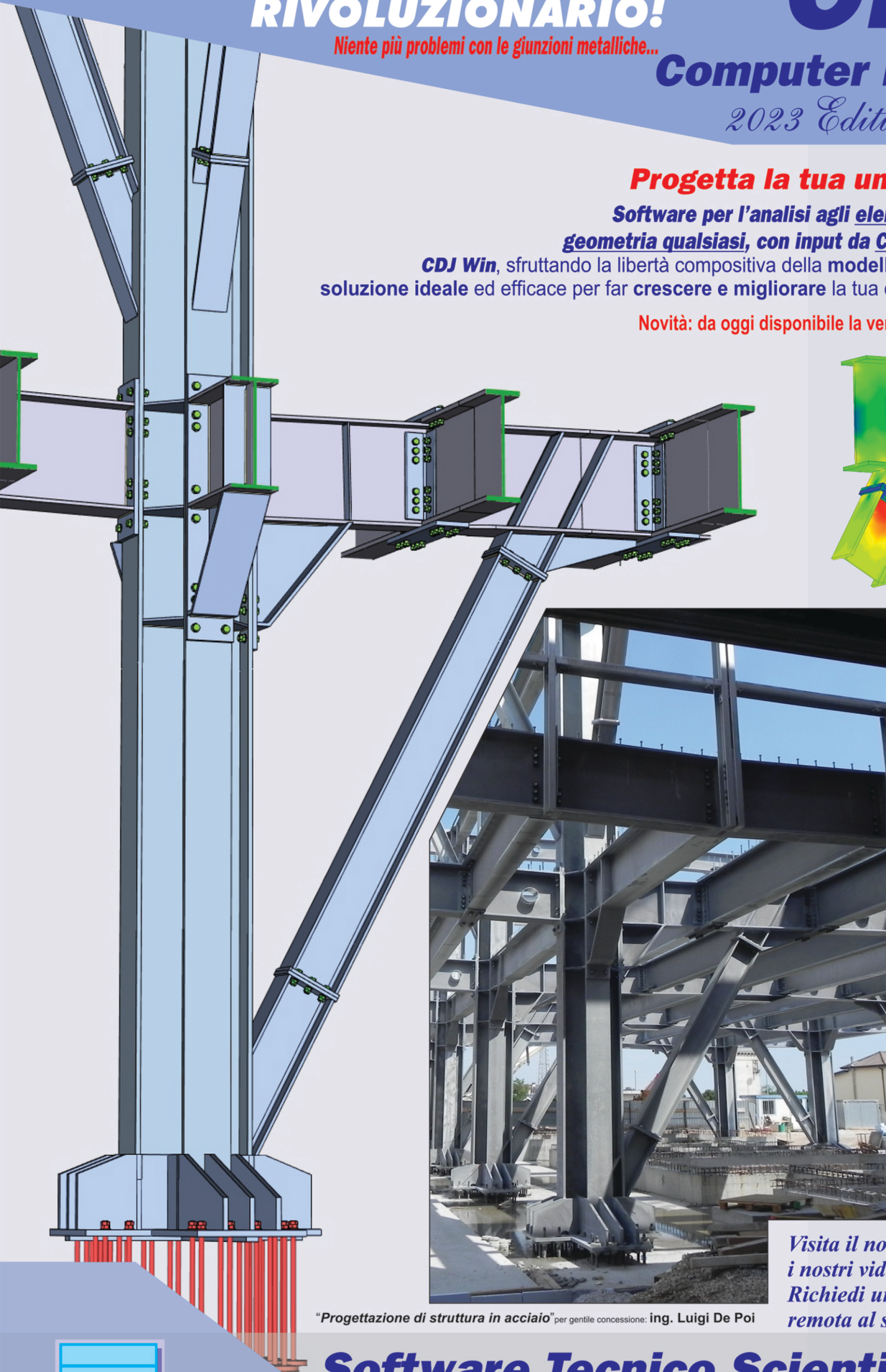
2023 Edition **FEA Connection**

Progetta la tua unione in acciaio con CDJ!!!

Software per l'analisi agli elementi finiti 3D delle unioni in acciaio di geometria qualsiasi, con input da CAD 3D integrato in modellazione solida

CDJ Win, sfruttando la libertà compositiva della modellazione tridimensionale, rappresenta una soluzione ideale ed efficace per far crescere e migliorare la tua esperienza nella progettazione strutturale!!

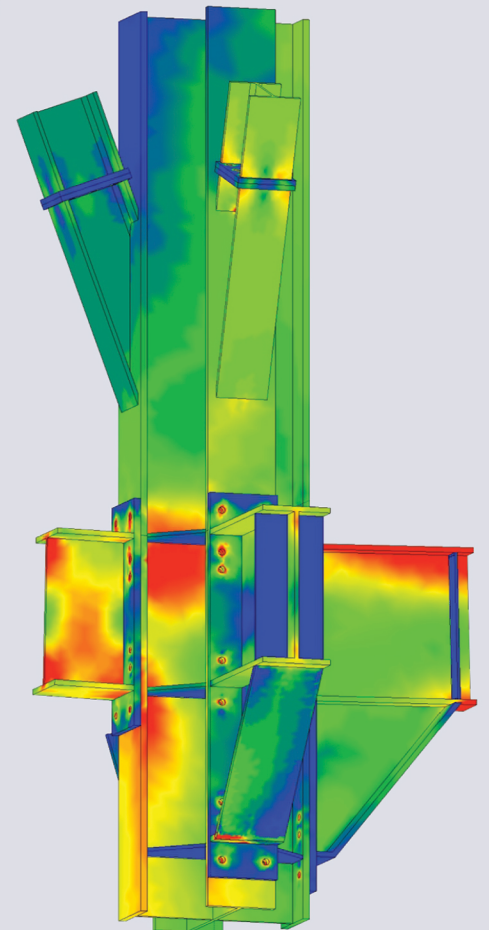
Novità: da oggi disponibile la versione "CDJ Junior - Base" a soli € 300.00 + iva



Mappatura tensioni di Von Mises



"Progettazione di struttura in acciaio" per gentile concessione: ing. Luigi De Poi



Visita il nostro sito www.stsweb.it per visionare i nostri video tutorials.

Richiedi una dimostrazione in connessione remota al seguente indirizzo email: cdj@stsweb.it



Software Tecnico Scientifico®

Via Tre Torri, 11 - 95030 Sant'Agata li Battiati (CT)
e-mail: sts@stsweb.it
tel. 095/7252559-7254855 fax 095/213813

Corso Gelone, 39 - 96100 Siracusa
e-mail: sts.siracusa@stsweb.it
tel. 0931/66220

Visiona i nostri video tutorials su 